

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Indicadores do potencial de aproveitamento de  
recursos energéticos endógenos em edifícios  
residenciais**

Pedro Miguel Duarte Dias

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Domingos Martins Monteiro

Fevereiro de 2009



A Dissertação intitulada

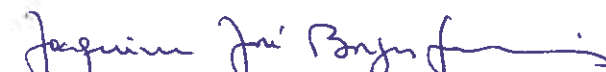
**“INDICADORES DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RECURSOS  
ENERGETICOS ENDÓGENOS EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS”**

foi aprovada em provas realizadas em 26/Fevereiro/2009

o júri



presidente Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva  
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Joaquim José Borges Gouveia  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro



Professor Doutor Claudio Domingos Martins Monteiro  
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor - Pedro Miguel Duarte Dias



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

# Resumo

Este trabalho tem como objectivo principal o desenvolvimento de uma metodologia geral, baseada em indicadores e valores de referência capaz de avaliar o potencial de aproveitamento de um edifício relativamente à aplicação de energias renováveis, mais concretamente microgeração fotovoltaica, microgeração eólica mas tendo sempre em atenção as características técnicas de instalação das mesmas, verificando a sua viabilidade, em termos da localização e ao nível económico (investimento). É importante também realçar o facto de que os consumos de cada edifício são igualmente importantes na medida em que este trabalho se prende também com a verificação da sustentabilidade energética do edifício após a aplicação das referidas tecnologias. Este trabalho visa também a contabilização das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela instalação de fontes de energia renováveis ao invés da utilização de combustíveis fósseis para satisfação do diagrama de cargas do edifício.

Outro objectivo deste trabalho foi verificar qual o nível de sustentabilidade de um edifício consoante os seus consumos anuais. Escolheu-se um tipo de consumo específico para escritórios (mediante a classe energética em que se insere) e para ambiente residencial, tendo em atenção as características de um edifício escolhido, e através da integração de recursos endógenos verificou-se qual o nível de satisfação dos consumos consoante as capacidades de produção.

Para poder realizar este trabalho foi necessário adquirir conhecimentos básicos sobre as tecnologias envolvidas bem como sobre as condições técnicas de funcionamento e regulamentação que os regem e também relativamente ao desempenho energético ao nível de consumo dos edifícios.

**Palavras-chave:** microgeração fotovoltaica, microgeração eólica, desempenho energético de edifícios, emissões de CO<sub>2</sub>



# Abstract

The primary objective for this document is the development of a general methodology, based on indicators and benchmarks, able to evaluate the potential use of a building on the application of renewable energy, specifically micro photovoltaics and micro wind, but always bearing in mind the technical characteristics of their installation, verifying their feasibility in terms of location and economic (investment).

It is important to stress the fact that the consumption of each building is also important and that this work also aims to verify the sustainability of the building energy after the application of these technologies.

Finally, the work also aims at accounting the emissions of CO<sub>2</sub> avoided by the installation of renewable energy sources instead of using fossil fuels to meet the load diagram of the building.

Another objective of this study was to determine the level of sustainability of a building based on its annual consumption. A specific type of consumption was selected for offices (considering the class of efficiency) and residential environment, taking into account the characteristics of the building chosen, and through the integration of internal resources it was determined the level of consumption satisfaction achieved through different production capacity.

To carry out this work, basic knowledge about the technologies involved and on the technical conditions of operation and regulations governing them was needed, as well as about the performance level of the energy consumption of buildings.

**Keywords:** Photovoltaic microgeneration, wind based microgeneration, energy performance of buildings, CO<sub>2</sub> emissions.



# Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Cláudio Domingos Monteiro, pelo apoio incansável que sempre demonstrou e por efectivamente me ter orientado, no verdadeiro sentido da palavra, não só durante a elaboração desta tese como durante todo o tempo em que com ele convivi.

Ao Eng. Ricardo Sá, por me ter proporcionado todas as condições necessárias ao desenvolvimento desta Dissertação de Mestrado e por sempre ter estado disponível e colaborante em todas as ocasiões.

Aos colegas da Edifícios Saudáveis Consultores, pela forma como me receberam e acolheram, por todo o apoio e disponibilidade demonstrada e por me terem tratado como colega e não como mero estagiário. Não poderia deixar de destacar os meus colegas de gabinete Marlene, Helder e Tiago...este trabalho também é vosso.

Ao colega e amigo Filipe “Leader” Rocha por toda a ajuda ao longo do estágio e também pela disponibilidade prestada!

A toda a minha família, com óbvia referência especial aos meus pais, Emídio e Fátima, às minhas irmãs Susana e Sara e amigo “Tigas” por sempre me terem apoiado e incentivado ao longo de todo este tempo e por serem a minha inspiração...

À minha namorada Sónia por tudo o que fez para que pudesse acreditar que era possível acabar o curso, estando “lá” nos momentos bons e nos maus, tentando sempre dar-me força e vontade para superar as mais diversas adversidades que encontrei ao longo da minha vida académica e não só... Este trabalho, é sem dúvida, para ti e por TI!

Aos amigos e companheiros de longas e difíceis batalhas no decorrer de todos estes anos de faculdade, que sempre me apoiaram e cuja amizade tenho o privilégio de merecer. Ricardo “Fuinha” Fernandes, Nuno “16:9” Correia, Helder “HH” Heitor, João “Sokota” Couto, Medeiros, Frederico “Brazuca”, Tiago “Piu”, Ricardo “Bilas”, “Chefe Pirius”, “Albertuk”, “Pink Paínhas”, Tiago “Ovar”, “Fox”, ...isto é também para vocês...





# Índice

Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice .....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Abreviaturas e Símbolos .....	xix
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do Problema .....	1
1.2. Motivação .....	4
1.3. Estrutura da Dissertação.....	5
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>7</b>
Sustentabilidade .....	7
2.1. Conceitos.....	7
2.2. ZEB (Zero Energy Building) .....	11
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>13</b>
Microgeração Fotovoltaica .....	13
3.1. Situação Actual da Energia Fotovoltaica .....	13
3.1.1. Situação Internacional .....	13
3.1.2. Situação em Portugal.....	16
3.2. Considerações Gerais.....	17
3.3. Radiação Solar .....	17
3.3.1. Radiação Solar - Definição.....	18
3.3.2. Radiação Directa e Difusa .....	19
3.3.3. Posição do Sol .....	20
3.3.4. Orientação Solar .....	21
3.4. Células Fotovoltaicas.....	22
3.4.1. Efeito Fotovoltaico e MPPT (“Maximum Power Point Tracking”).....	22
3.4.2. Tipos de Células.....	23
3.4.2.1. Tipos de Instalações.....	24

3.5. Constituintes de um Sistema Fotovoltaico.....	26
3.5.1. Painéis ou Módulos Fotovoltaicos .....	26
3.5.2. Inversores .....	28
3.5.3. Reguladores de Carga .....	29
3.5.4. Baterias .....	29
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>31</b>
Microgeração Eólica.....	31
4.1. Situação Actual da Energia Eólica.....	31
4.1.1. Situação Internacional .....	31
4.1.2. Situação em Portugal .....	33
4.2. Recurso Eólico.....	34
4.3. Tecnologia Eólica .....	36
4.3.1. Distribuição de Weibull .....	41
4.4. Tipos de Instalações.....	41
4.5. Constituintes de um Sistema Eólico .....	42
4.5.1. Turbinas .....	42
4.5.1.1. Eixo Horizontal.....	42
4.5.1.2. Eixo Vertical.....	42
4.5.1.3. Vantagens e Desvantagens das Turbinas de Eixo Horizontal e Eixo Vertical	43
4.5.2. Gerador .....	44
4.5.3. Baterias .....	44
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>45</b>
Sistema Fotovoltaico.....	45
5.1. Metodologia de Cálculo da Energia Produzida pelo Sistema Fotovoltaico .....	45
5.1.1. Cálculo da Radiação Extraterrestre, Global, Difusa, Directa e do Albedo no Plano Horizontal e no Plano da Superfície a Instalar .....	46
5.1.1.1. Radiação Diária Extraterrestre ( $H_0$ ) .....	47
5.1.1.2. Plano Horizontal .....	47
5.1.1.2.1. Radiação Diária Global ( $H$ ) no Plano Horizontal .....	47
5.1.1.2.2. Radiação Diária Difusa ( $H_d$ ) no Plano Horizontal .....	48
5.1.1.2.3. Radiação Diária Directa ( $H_b$ ) no Plano Horizontal .....	48
5.1.1.2.4. Radiação do Albedo ( $H_{\text{Albedo}}$ ) no Plano Horizontal .....	49
5.1.1.3. Plano da Superfície de Instalação .....	49
5.1.1.3.1. Radiação Horária Global ( $h$ ) no Plano Horizontal .....	50
5.1.1.3.2. Radiação Horária Difusa ( $h_d$ ) no Plano Horizontal .....	51
5.1.1.3.3. Radiação Horária Directa ( $h_b$ ) no Plano Horizontal .....	51
5.1.1.3.4. Radiação Horária Difusa ( $h'_d$ ) no Plano da Superfície de Instalação .....	51
5.1.1.3.5. Radiação Horária Directa ( $h'_b$ ) no Plano da Superfície de Instalação .....	52
5.1.1.3.6. Radiação Horária do Albedo ( $h'_{\text{Albedo}}$ ) no Plano da Superfície de Instalação .....	52
5.1.1.3.7. Radiação Total Horária ( $h_t$ ) no Plano da Superfície de Instalação.....	52
5.2. Energia Produzida pelo Sistema Fotovoltaico .....	52
5.3. Custo Nivelado de Energia .....	53
5.4. CO <sub>2</sub> Evitado .....	53
5.5. Resultados por m <sup>2</sup> .....	54
5.5.1. “Melhor” Situação .....	54
5.5.1.1. Radiação Total nos Dias Médios .....	54
5.5.1.2. Radiação Total nos Dias Médios para o Pior e Melhor Mês .....	55
5.5.1.3. Produções Mensais .....	55
5.5.1.4. Produção Anual .....	56
5.5.1.5. Custo Nivelado de Energia .....	56
5.5.1.6. CO <sub>2</sub> Evitado.....	56
5.5.2. “Pior” Situação .....	57
5.5.2.1. Produções Mensais .....	57
5.5.2.2. Produção Anual .....	57
5.5.2.3. Custo Nivelado de Energia .....	57

5.5.2.4. CO <sub>2</sub> Evitado .....	58
5.6. Conclusões .....	58
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>59</b>
Sistema Eólico .....	59
6.1. Metodologia de Cálculo da Energia Produzida pelo Sistema Eólico .....	59
6.1.1. Características dos Aerogeradores Consoante a sua Tipologia .....	60
6.1.2. Cálculo da Curva de Potência dos Aerogeradores .....	62
6.1.3. Cálculo do Coeficiente Máximo de Extração de Potência do Vento (C) .....	65
6.1.4. Cálculo da Potência Nominal do Aerogerador em Função da Área de Varrimento .....	68
6.1.5. Cálculo do Custo de cada Aerogerador em Função da Área de Varrimento .....	71
6.1.6. Número de Aerogeradores por Edifício .....	75
6.1.7. Correção do Valor da Velocidade do Vento para a Altura do Edifício .....	76
6.2. Energia Produzida pelo Sistema Micro Eólico .....	76
6.3. Custo Nivelado de Energia .....	77
6.4. CO <sub>2</sub> Evitado .....	77
6.5. Resultados .....	78
6.6. Conclusões .....	78
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>81</b>
Caso de Estudo .....	81
7.1. Resultados .....	81
7.1.1. Escritórios .....	81
7.1.1.1. Microgeração Fotovoltaica .....	82
7.1.1.2. Microgeração Eólica .....	86
7.1.2. Residencial .....	89
7.1.2.1. Microgeração Fotovoltaica .....	89
7.1.2.2. Microgeração Eólica .....	90
7.2. Certificação de Edifícios Não Residenciais para Classe A+ .....	90
7.3. Conclusões .....	91
7.3.1. Sistema Fotovoltaico .....	91
7.3.1.1. Escritórios .....	91
7.3.1.2. Residencial .....	91
7.3.2. Sistema Eólico .....	92
7.3.2.1. Escritórios .....	92
7.3.2.2. Residencial .....	92
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>93</b>
Conclusões e Perspectivas Futuras .....	93
8.1. Conclusões .....	93
8.1.1. Caso de Estudo .....	94
8.2. Perspectivas Futuras .....	95
<b>Referências .....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo I - Cálculo do Integral de <math>R_b</math> .....</b>	<b>101</b>



# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b> - Evolução do preço do barril de petróleo de 2007/2008 [1]. .....	1
<b>Figura 1.2</b> - Distribuição do consumo de energia na União Europeia num total de $10^{12}$ MWh por ano [5]. .....	2
<b>Figura 1.3</b> - Evolução das emissões de GEE em 2004 relativamente a 1990 [8]. .....	3
<b>Figura 1.4</b> - Tipo de GEE emitidos em 2004 relativamente a 1990 [8]. .....	3
<b>Figura 2.1</b> - Utilização dos recursos naturais [18]. .....	8
<b>Figura 2.2</b> - Dimensão ambiental, económica e social do desenvolvimento sustentável [18]. .....	9
<b>Figura 2.3</b> - Aspectos construtivos essenciais para um edifício sustentável com a fachada principal virada a sul [18]. .....	10
<b>Figura 2.4</b> - Exemplo de uma maqueta de um ZEB [27]. .....	12
<b>Figura 3.1</b> - Distribuição de centrais fotovoltaicas no mundo [30]. .....	14
<b>Figura 3.2</b> - Produção FV a nível mundial referente ao ano de 2007 [30]. .....	14
<b>Figura 3.3</b> - Crescimento anual da potência instalada [28]. .....	15
<b>Figura 3.4</b> - Irradiação solar diária em Lisboa numa placa horizontal de superfície de 1 m <sup>2</sup> para 4 dias no ano [34]. .....	18
<b>Figura 3.5</b> - Distribuição da radiação solar diária em Portugal em plano horizontal [37]. .....	19
<b>Figura 3.6</b> - Representação das componentes da radiação solar [34]. .....	19
<b>Figura 3.7</b> - Altura e azimute solar [40]. .....	20
<b>Figura 3.8</b> - Órbita da Terra. ....	21
<b>Figura 3.9</b> - Diferentes inclinações para diferentes alturas do ano [41]. .....	21
<b>Figura 3.10</b> - Variação da produção com o posicionamento do painel [43]. .....	22
<b>Figura 3.11</b> - Representatividade de cada tecnologia no mercado global [28]. .....	24

<b>Figura 3.12</b> - Tipos de painéis a nível mundial referentes ao último semestre de 2007 [28].	25
<b>Figura 3.13</b> - Instalação de sistemas fotovoltaicos mediante o local no final de 2007 [28].	25
<b>Figura 3.14</b> - Ligação em série de três módulos fotovoltaicos [38].	26
<b>Figura 3.15</b> - Ligação em paralelo de três módulos fotovoltaicos [38].	26
<b>Figura 3.16</b> - Curvas características do painel para diferentes radiações incidentes para um painel de 50Wp [38].	27
<b>Figura 3.17</b> - Curvas características do painel para uma radiação de 1000 W/m <sup>2</sup> [38].	28
<b>Figura 4.1</b> - Distribuição da potência eólica em Portugal, final de 2007 [51].	33
<b>Figura 4.2</b> - Distribuição da potência ligada por escalões [52].	34
<b>Figura 4.3</b> - Exemplo de um moinho de vento [54].	34
<b>Figura 4.4</b> - Velocidade do vento em Portugal medido a 60m do solo [51].	35
<b>Figura 4.5</b> - Representação da turbulência num edifício [51].	35
<b>Figura 4.6</b> - Exemplo da instalação de um aerogerador (exemplo: eixo vertical) num edifício [51].	36
<b>Figura 4.7</b> - Fluxo de ar através de uma área transversal A [59].	37
<b>Figura 4.8</b> - Potência versus Velocidade do Vento [58].	38
<b>Figura 4.9</b> - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 0.	39
<b>Figura 4.10</b> - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 1: áreas abertas, com poucos ventos.	39
<b>Figura 4.11</b> - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 2: terrenos agrícolas com quebras de vento.	40
<b>Figura 4.12</b> - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 3: zonas urbanas, florestas e terrenos agrícolas com muitos ventos.	40
<b>Figura 4.13</b> - Exemplos de turbinas de eixo horizontal [66].	42
<b>Figura 4.14</b> - Exemplos de turbinas de eixo vertical (Darius, H e Savonius) [66].	43
<b>Figura 5.1</b> - Radiação média diária mensal obtida através do RetScreen.	48
<b>Figura 5.2</b> - Radiação total dos dias médios em intervalos de 15 minutos.	54
<b>Figura 5.3</b> - Radiação total dos dias médios em intervalos de 15 minutos para Janeiro e Agosto.	55
<b>Figura 5.4</b> - Gráfico representativo da produção mensal em Wh.	55
<b>Figura 5.5</b> - Gráfico representativo da produção mensal em Wh.	57
<b>Figura 6.1</b> - Curva de potência para aerogeradores de 2 pás.	63

<b>Figura 6.2</b> - Curva de potência para aerogeradores de 3 pás. ....	64
<b>Figura 6.3</b> - Curva de potência para aerogeradores de 6 pás. ....	64
<b>Figura 6.4</b> - Curva de potência para aerogeradores de 6 pás. ....	64
<b>Figura 6.5</b> - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 2 pás. ....	66
<b>Figura 6.6</b> - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 3 pás. ....	66
<b>Figura 6.7</b> - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 6 pás. ....	67
<b>Figura 6.8</b> - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de eixo vertical. ....	67
<b>Figura 6.9</b> - Regressão linear para aerogeradores de 2 pás. ....	69
<b>Figura 6.10</b> - Regressão linear para aerogeradores de 3 pás. ....	69
<b>Figura 6.11</b> - Regressão linear para aerogeradores de 6 pás. ....	70
<b>Figura 6.12</b> - Regressão linear para aerogeradores de eixo vertical. ....	70
<b>Figura 6.13</b> - Regressão linear para aerogeradores de 2 pás. ....	71
<b>Figura 6.14</b> - Regressão linear para aerogeradores de 3 pás. ....	72
<b>Figura 6.15</b> - Regressão linear para aerogeradores de 6 pás. ....	72
<b>Figura 6.16</b> - Regressão linear para aerogeradores de eixo vertical. ....	73
<b>Figura 6.17</b> - Regressão logarítmica para aerogeradores de 2 pás. ....	73
<b>Figura 6.18</b> - Regressão logarítmica para aerogeradores de 3 pás. ....	74
<b>Figura 6.19</b> - Regressão logarítmica para aerogeradores de 6 pás. ....	74
<b>Figura 6.20</b> - Regressão logarítmica para aerogeradores de eixo vertical. ....	75
<b>Figura 6.21</b> - Gráfico representativo da produção anual de cada aerogerador. ....	78
<b>Figura 7.1</b> - Dimensões do edifício em análise. ....	82
<b>Figura 7.2</b> - Representação gráfica da produção de FV no edifício. ....	84
<b>Figura 7.3</b> - Representação gráfica da produção do edifício. ....	85
<b>Figura 7.4</b> - Representação gráfica da produção dos aerogeradores. ....	88





## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Distribuição das maiores centrais fotovoltaicas no Mundo [28]. .....	15
Tabela 3.2 - Quadro representativo dos rendimentos dos diferentes tipos de células [46]. ....	24
Tabela 4.1 - Tabela da potência acumulada no final de cada ano (MW) [50]. .....	32
Tabela 4.2 - Potência por metro quadrado para diferentes velocidades do vento. ....	37
Tabela 4.3 - Coeficiente característico mediante o local de instalação [62]. .....	41
Tabela 4.4 - Vantagens e desvantagens das turbinas (eixo horizontal e vertical). ....	43
Tabela 5.1 - Dias médios de cada mês. ....	45
Tabela 5.2 - Valores de $p$ para cada tipo de solo. ....	49
Tabela 5.3 - Somatório das produções mensais. ....	56
Tabela 5.4 - Custo nivelado de energia. ....	56
Tabela 5.5 - CO <sub>2</sub> evitado através da utilização de energias renováveis. ....	56
Tabela 5.6 - Somatório das produções mensais. ....	57
Tabela 5.7 - Custo nivelado de energia. ....	57
Tabela 5.8 - CO <sub>2</sub> evitado através da utilização de energias renováveis. ....	58
Tabela 6.1 - Eixo horizontal, 2 pás [66]. ....	60
Tabela 6.2 - Aerogeradores de eixo horizontal, 3 pás [66]. ....	61
Tabela 6.3 - Aerogeradores de eixo horizontal, 6 pás [66]. ....	62
Tabela 6.4 - Aerogeradores de eixo vertical [66]. ....	62
Tabela 6.5 - Coeficiente máximo de extracção de potência para cada velocidade do vento. ....	68
Tabela 6.6 - Valores da velocidade média na cidade do Porto. ....	76

Tabela 6.7 - Produção de cada aerogerador de 1 kW. ....	78
Tabela 7.1 e 7.2 - Produções para a cobertura. ....	83
Tabela 7.3 - Produção fachada nº 1. ....	83
Tabela 7.4 - Produção fachada nº 2 e 3. ....	83
Tabela 7.5 - Produção fachada nº 4. ....	83
Tabela 7.6 - Valores obtidos para inclinação da cobertura igual a 35°. ....	84
Tabela 7.7 - Produção Anual versus Consumo Anual. ....	84
Tabela 7.8 - Valores obtidos para inclinação da cobertura igual a 0°. ....	85
Tabela 7.9 - Produção anual versus consumo anual. ....	85
Tabela 7.10 - Valores obtidos mediante inclinação da cobertura. ....	86
Tabela 7.11 - Valores da velocidade média na cidade do Porto. ....	86
Tabela 7.12 - Produção de aerogeradores de 2 pás. ....	86
Tabela 7.13 - Produção de aerogeradores de 3 pás. ....	87
Tabela 7.14 - Produção de aerogeradores de 6 pás. ....	87
Tabela 7.15 - Produção de aerogeradores de eixo vertical pás. ....	87
Tabela 7.16 - Valores obtidos para cada aerogerador. ....	88
Tabela 7.17 e 7.18 - Produções para a cobertura. ....	89
Tabela 7.19 - Resultados obtidos para a cobertura considerando aproveitamento máximo da área disponível. ....	89
Tabela 7.20 - Resultados obtidos para a cobertura considerando apenas a área necessária para suprir em 100% o consumo. ....	90
Tabela 7.21 - Valores obtidos para cada aerogerador. ....	90

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de Abreviaturas

AC	Corrente Alternada ( <i>Alternate Current</i> )
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
CIGS	Cobre, Índio, Gálio, Selénio
CIS	Cobre, Índio, Selénio
CNE	Custo Nivelado de Energia
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Cut-In	Velocidade de Entrada em funcionamento de um aerogerador
Cut-Off	Velocidade de Saída de funcionamento de um aerogerador
DC	Corrente Contínua ( <i>Direct Current</i> )
EAP	Energia Anual Produzida
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases de Efeito Estufa
I	Investimento
I-V	Corrente - Tensão
LZC	<i>Low or Zero Carbon Energy Techonologies</i>
MG	Microgeração
O&M	Operação e Manutenção
RWS	Velocidade Nominal do Vento ( <i>Rated Wind Speed</i> )
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
T2	Apartamento com 2 quartos, 1 cozinha, 1 sala e 1 quarto de banho
T3	Apartamento com 3 quartos, 1 cozinha, 1 sala e 1 quarto de banho
URE	Utilização Racional de Energia
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>

## Lista de Símbolos

$\varnothing$	Latitude
$d_n$	Dia Médio do Mês (0-365)
$\delta$	Declinação
$w_s$	Ângulo Horário de nascer do Sol
$w_p$	Ângulo Horário de Pôr-do-Sol
$\theta_z$	Distância Zenital
$\gamma_s$	Elevação Solar
$\Psi_s$	Azimute Solar
$w$	Ângulo Solar
$H_0$	Radiação Diária Extraterrestre
$\alpha$	Azimute do Plano (Microgeração Fotovoltaica)
$\theta_s$	Ângulo de Incidência Solar
$I_{sc}$	Constante Solar
$K_T$	Índice de Atenuação
$H$	Radiação Diária Global no plano horizontal
$H_d$	Radiação Diária Difusa no plano horizontal
$H_b$	Radiação Diária Directa no plano Horizontal
$H_{Albedo}$	Radiação Diária do Albedo
$\rho$	Coeficiente de Reflexão do Solo (Microgeração Fotovoltaica)
$R_b$	Factor Geométrico
$w_{ss}$	Ângulo da hora de saída do Sol sobre o plano
$h$	Radiação Horária Global no plano horizontal
$h_d$	Radiação Horária Difusa no plano horizontal
$h_b$	Radiação Horária Directa no plano horizontal
$r_t$	Coeficiente de conversão da radiação diária global em radiação horária global no plano horizontal
$r_d$	Coeficiente de conversão da radiação diária difusa em radiação horária difusa no plano horizontal
$\beta$	Ângulo de inclinação da superfície de instalação
$h'_d$	Radiação Horária Difusa no plano da superfície de instalação
$h'_b$	Radiação Horária Directa no plano da superfície de instalação
$h'_{Albedo}$	Radiação Horária do Albedo no plano da superfície de instalação
$h_t$	Radiação Horária Total no plano da superfície de instalação
$\overline{H_t}$	Radiação Total Anual incidente na superfície de instalação
$\eta_{MPPT}$	Rendimento do MPPT
$\zeta_e$	Factor de anualização
$\eta_e$	Tempo médio de vida do equipamento

I	Taxa de actualização
C	Coeficiente máximo de extracção de Potência
$\alpha$	Coeficiente de rugosidade do terreno (Microgeração Eólica)
P	Potência
A	Área de Varrimento
v	Velocidade do Vento
$\rho$	Densidade do Ar (Microgeração Eólica)



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Enquadramento do Problema

Desde meados do século XIX até à actualidade, o petróleo e os seus derivados têm tomado conta do nosso quotidiano e de tudo o que dele depende para gerar energia e alimentar a Humanidade [1].

Dada a preocupante escalada do preço e consumo dos combustíveis fósseis e devido aos seus efeitos para o planeta, numerosos têm sido os debates sobre esta temática, bem como os acordos que os vários governos assinam em prol de um mundo energeticamente mais equilibrado e menos dependente do petróleo [1].

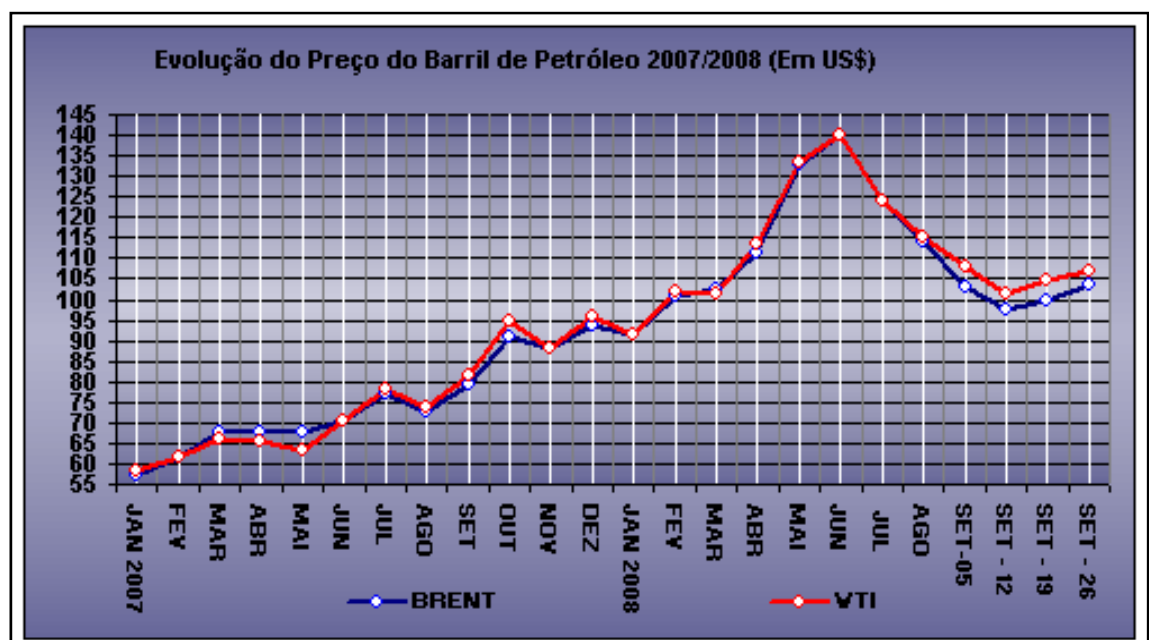


Figura 1.1- Evolução do preço do barril de petróleo de 2007/2008 [1].



## 2 Introdução

O desenvolvimento das energias renováveis teve início com as crises petrolíferas da década de 70 e com a consciencialização da humanidade de que os recursos fósseis se esgotarão um dia.

Desde então, a questão energética tem vindo a adquirir uma importância cada vez maior. Tornou-se evidente que a utilização do carvão e do petróleo não correspondia à nova exigência de um desenvolvimento sustentável. Além disso, a tomada de consciência dos enormes danos que esse tipo de recursos provoca no planeta passou a adquirir um lugar de destaque. Danos esses que se traduzem no aquecimento global, no declínio da qualidade do ar e em consequências para a saúde pública [2].

Nos dias de hoje, não há nenhuma política económica séria que não atenda à questão das alterações climáticas provocadas pelo efeito de estufa, criado por emissões excessivas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). O mesmo se aplica, por maioria de razão, à política de energia. Acabou definitivamente o tempo em que se pensava que o equilíbrio ambiental era contraditório com uma estratégia de crescimento da economia [2].

A redução das emissões de  $\text{CO}_2$  no sector energético tornou-se uma das prioridades mais elevadas para os Governos Nacionais da União Europeia. As principais abordagens a explorar para reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$  passam pela redução dos consumos energéticos e a mudança para outras fontes de energia renováveis [3].

Olhando o futuro nesta perspectiva, o fim do petróleo economicamente viável, pode representar para Portugal, uma boa oportunidade de vencer a sua dependência energética externa, já que o potencial de energias renováveis é abundante! Portugal ocupa a 8ª posição no ranking dos países mais atractivos para o investimento internacional em energias renováveis [4].

A integração de renováveis no sector eléctrico e nomeadamente ao nível de edifícios torna-se muito importante porque o sector dos edifícios representa cerca de 41% do consumo de energia final na Europa. Este sector possui um enorme potencial de poupança, sendo cerca de 22% a curto prazo (até 2010) [5].

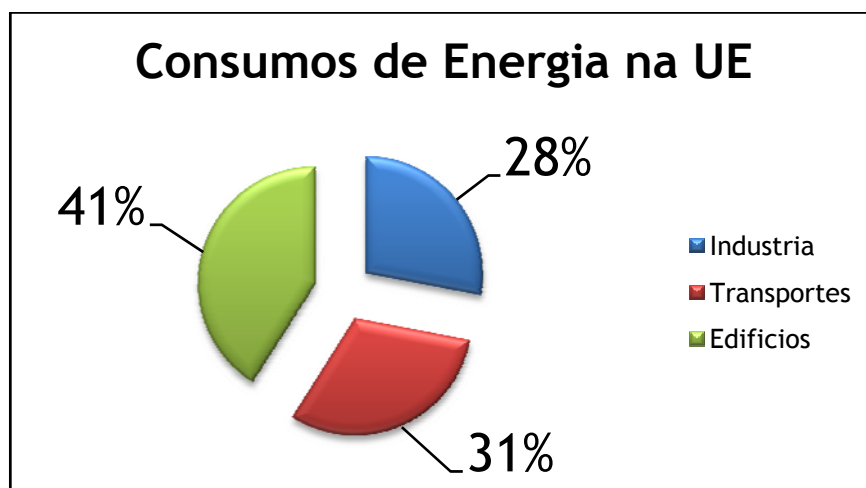


Figura 1.2 - Distribuição do consumo de energia na União Europeia num total de  $10^{12}$  MWh por ano [5].

Devido ao protocolo de Kyoto, assinado a 11 de Dezembro de 1997, a União Europeia comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de elevada contribuição para o efeito de

estufa em 8% até 2012, comparativamente ao nível verificado em 1990. É neste aspecto que os edifícios devem desempenhar um papel muito importante para atingir este objectivo [6].

Portugal comprometeu-se em não aumentar em mais de 27% as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) durante esse período [7].

Relativamente a Kyoto, Portugal em Abril de 2007 realizou um estudo que levou à conclusão de que em 2004 o total de emissões de GEE contabilizaram 84,5 MtCO<sub>2</sub>, o que representa um aumento de 41% quando comparado com as emissões registadas em 1990 (aumento de cerca de 3% por ano) [8].

Este nível (2004) encontra-se cerca de 22% acima da linha de tendência que seria esperada para que fosse cumprido o objectivo de Kyoto desde 1990 até 2010 [8].

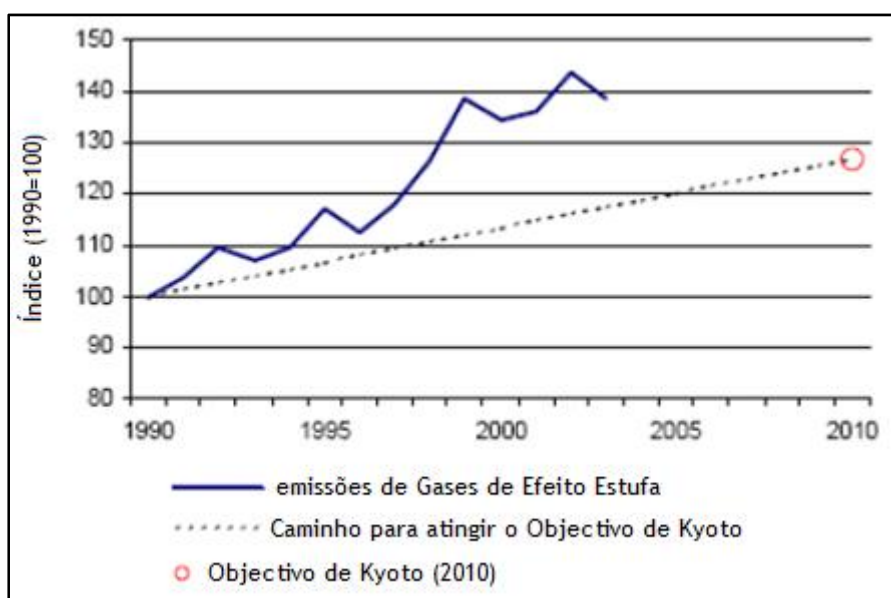


Figura 1.3 - Evolução das emissões de GEE em 2004 relativamente a 1990 [8].

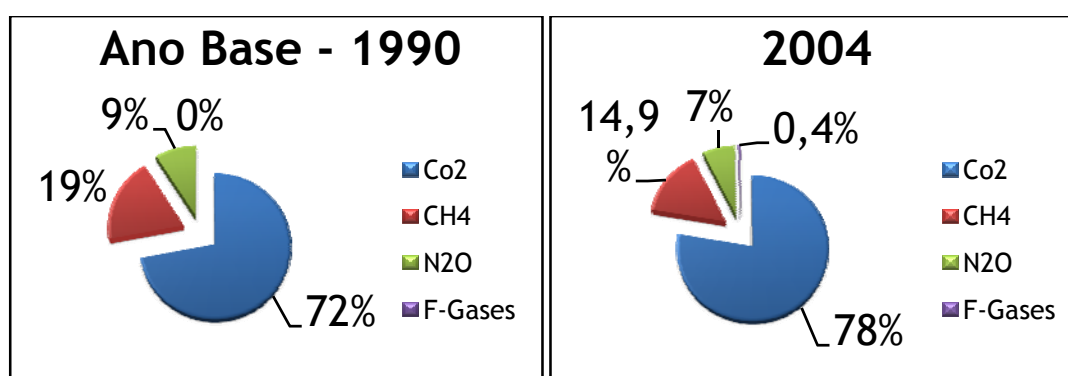


Figura 1.4 - Tipo de GEE emitidos em 2004 relativamente a 1990 [8].

Tendo em vista a possibilidade de redução dos elevados consumos dos edifícios, foram realizados vários testes através dos quais se concluiu que várias tecnologias de energias renováveis podem ser integradas em edifícios com sucesso e rendimentos bastante elevados [9].

Os diferentes tipos de tecnologias de energias renováveis são mais ou menos apropriados para integração num edifício, mediante as suas características físicas, disponibilidade de recursos e tipo de utilização a que se destinam [9].

A introdução de energias renováveis integradas em edifícios, vai permitir a aproximação da produção aos locais de consumo o que é claramente uma solução a considerar para a obtenção de uma elevada eficiência energética.

Além de aumentar a eficiência energética de um edifício, os sistemas instalados podem produzir tanta energia final quanto a que o edifício necessita no seu dia-a-dia, tornando-o num “Zero Energy Building” (ZEB) [10].

Neste momento, em Portugal, existe um mercado emergente para a microgeração, segundo a legislação aplicada nomeadamente através do Decreto-Lei 363/2007 de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de energia por intermédio de unidades de microprodução, também designado por “Renováveis na Hora”. Esta iniciativa apresenta-se como uma medida inovadora, pois tem como objectivo promover a instalação de 50 mil sistemas fotovoltaicos ou micro-eólicos até 2010, com um especial incentivo à instalação de colectores solares para aquecimento de água em habitações [11].

Este Decreto-Lei prevê que a electricidade produzida se destine predominantemente a consumo próprio, sendo o excedente passível de ser entregue a terceiros ou à rede pública, com o limite de 150 kW de potência no caso de a entrega ser efectuada à rede pública [11].

Com a introdução destas novas tecnologias limpas, vão notar-se algumas vantagens relativamente aos meios de produção convencionais, nomeadamente ao nível ambiental e relativamente ao sistema eléctrico de energia. Algumas das alterações mais significativas são a redução dos gases emitidos e a redução da distância entre consumidor e produtor (no caso da localização em edifícios essa distância é nula) o que origina uma redução das perdas na rede resultantes do transporte.

### 1.2. Motivação

A questão ambiental e o aumento gradual dos consumos energéticos, são factores condicionantes fundamentais para o desenvolvimento económico e sustentável do nosso país.

Em todas as projecções económicas, os combustíveis fósseis surgem como a principal fonte de utilização no mercado de produção de energia eléctrica; deste modo, aumentam os indícios sobre as implicações das emissões de CO<sub>2</sub> nas alterações climáticas.

Portugal é o 5.º país na Europa que utiliza mais energias renováveis na produção de electricidade, produzindo 42% da sua electricidade com energias renováveis; apesar disso o objectivo para 2020 é chegar aos 60% [12], sendo muito importante fomentar o uso destas mesmas tecnologias para satisfazer os requisitos energéticos e ambientais, através da implementação nos locais de consumo, nesta situação em concreto em edifícios.

Como Portugal é rico nestes recursos renováveis, faz sentido explorá-los, para reduzir a dependência energética, conduzindo deste modo à sustentabilidade energética do nosso país [13].

As tecnologias que foram objecto de estudo neste trabalho foram a microgeração Fotovoltaica e a microgeração Eólica.

Em relação à microgeração fotovoltaica a sua grande vantagem face às restantes energias renováveis é o facto de os sistemas serem modulares, o que lhes permite uma grande capacidade de adaptação em variadíssimas aplicações (coberturas e fachadas).

Relativamente às micro-turbinas é importante referir que o rápido crescimento e consequente implementação das turbinas de grande porte, por proporcionarem mais altos rendimentos levou a que este tipo de tecnologia não tenha tido um aumento tão significativo como as de grande porte.

Segundo as previsões da **INTELI** (Inteligência em Inovação), prevêem-se os seguintes potenciais investimentos associados à microgeração (MG):

- Micro-Eólica em 100.000 casas até 2020;
- Fotovoltaico/Solar térmico em 350.000 casas até 2020.

A sustentabilidade de um edifício e a possibilidade de o tornar num ZEB tornou-se um desafio muito motivador quer ao nível pessoal quer a nível empresarial pois a obtenção desta mesma sustentabilidade representa um decréscimo dos níveis de CO<sub>2</sub>, um aumento da eficiência energética do edifício e um importante passo na obtenção de um futuro mais “limpo”.

Esta dissertação de mestrado foi realizada em colaboração com a empresa Edifícios Saudáveis Consultores (ESC), uma empresa que presta serviços de consultoria especializada nas áreas da sustentabilidade ambiental em edifícios, com especial enfoque na utilização de energia (eficiência energética e integração de fontes renováveis). Neste sentido pretendeu-se obter alguma experiência profissional, tendo sido possibilitado o contacto directo com a realidade sobre eficiência energética e em especial com a integração de energias renováveis.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

No capítulo 2, efectua-se uma breve análise sobre o conceito de sustentabilidade energética, eficiência energética e o conceito de ZEB.

No capítulo 3, é feita numa primeira análise uma descrição da situação actual do mercado Fotovoltaico, a nível mundial e em Portugal. Posteriormente, são descritos os aspectos básicos relativos ao princípio Fotovoltaico, nomeadamente as radiações existentes, a posição do sol e a respectiva orientação solar. É feita também referência aos elementos constituintes dos sistemas de microgeração Fotovoltaica.

No capítulo 4, é realizada uma análise ao recurso eólico, à tecnologia de microgeração Eólica e ao tipo de turbinas existentes. É feita também referência aos elementos constituintes dos sistemas de microgeração Eólica.

No capítulo 5, é realizada a descrição dos cálculos efectuados com vista à obtenção da produção de um sistema de microgeração Fotovoltaica.

No capítulo 6, é realizada a descrição dos cálculos efectuados com vista à obtenção da produção de um sistema de microgeração Eólica.

No capítulo 7, é apresentado o caso de estudo realizado.

No capítulo 8, estão expostas as conclusões retiradas do trabalho e são referidas algumas indicações sobre o trabalho futuro que poderá vir a ser desenvolvido.



## Capítulo 2

# Sustentabilidade

### 2.1. Conceitos

“Sustentável, que se pode sustentar, capaz de se manter mais ou menos constante, ou estável, por longo período” [14].

Este novo conceito surgiu da busca persistente em solucionar os problemas ocasionados pela exploração descontrolada dos recursos naturais, ao longo da história da humanidade, tornando-se cada vez mais evidente, nas últimas duas décadas, a gravidade das consequências das explorações predatórias da natureza. Quando se aborda sustentabilidade, deve-se considerar a interdisciplinaridade do seu conceito. A sustentabilidade abarca várias áreas do conhecimento humano, entre elas a mais lembrada talvez seja a ambiental [15].

Considera-se que o marco para a construção do conceito de desenvolvimento sustentável teve início na década de 70, mais propriamente, a partir da Conferência de Estocolmo (“United Nations Conference on the Human Environment”), realizada em 1972. Nesta conferência, a discussão concentrava-se à volta de dois temas: poluição e preservação.

Em 1982, a Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development) produziu um documento intitulado Nosso Futuro Comum (“Our Common Future”), o qual ficou mais conhecido como Relatório “Brundtland”, que denunciou a recusa dos países em desenvolvimento de tratar as questões ambientais em seu estrito senso, amparados no facto de que consideravam que primeiro deveriam ser discutidos os paradigmas de desenvolvimento e a sua repercussão na utilização dos recursos naturais e sistemas ecológicos. A partir daí, as propostas da Comissão direccionaram-se para a noção de desenvolvimento sustentável, e enfatizaram a necessidade de cooperação internacional para se resolverem os problemas do meio ambiente. Surgiu ali a mais conhecida definição de desenvolvimento sustentável, dentre as diversas que podem ser encontradas no discurso ambientalista:

“Modelo de desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem afectar a capacidade de gerações futuras de também satisfazer as suas próprias necessidades” [16].

O desenvolvimento sustentável tem-se mostrado bastante dependente da energia eléctrica, por isso a produção de energia eléctrica é, entre as actividades desenvolvidas pelo

homem, uma das mais intensivas em recursos naturais, produzindo importantes alterações no ambiente [17].

A ideia de desenvolvimento sustentável tem por base o princípio de que o Homem deve gastar os recursos naturais de acordo com a capacidade de renovação desses recursos, de modo a evitar o seu esgotamento.

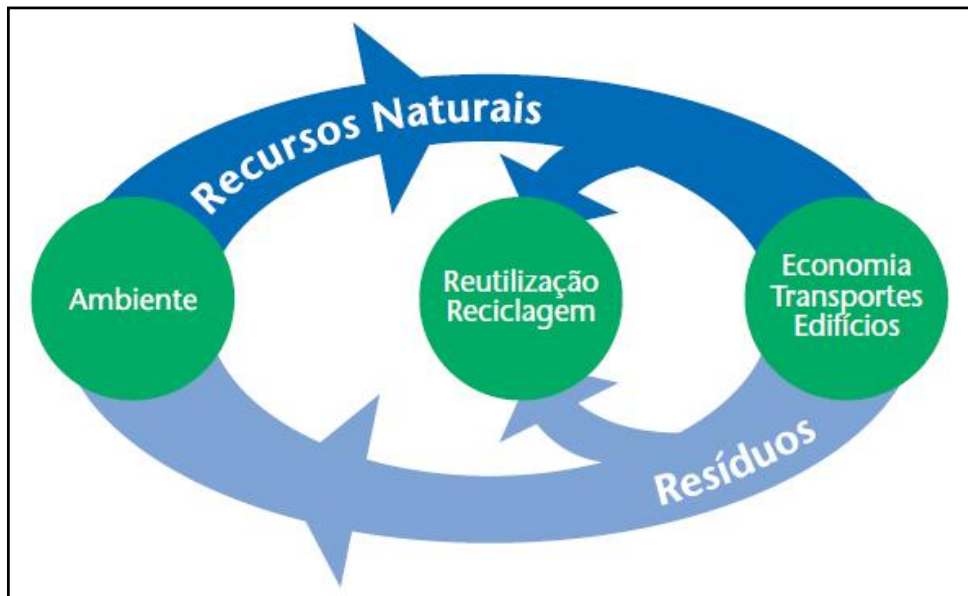
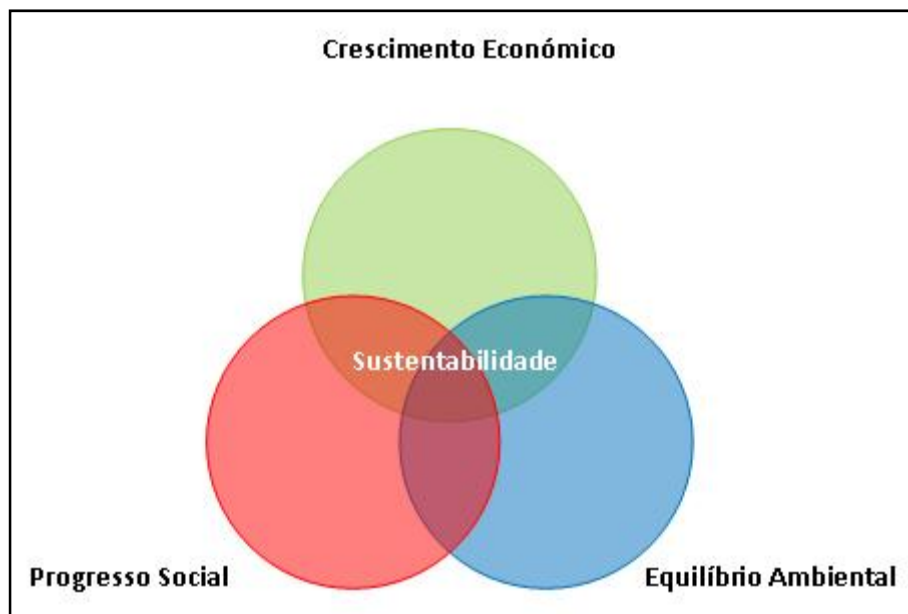


Figura 2.1 - Utilização dos recursos naturais [18].

A sustentabilidade assenta nos seguintes princípios ou regras de gestão de recursos:

- A exploração dos recursos renováveis não deve exceder os ritmos de regeneração;
- As emissões de resíduos poluentes devem ser reduzidas ao mínimo e não devem exceder a capacidade de absorção e de regeneração dos ecossistemas;
- Os recursos não renováveis devem ser explorados de um modo quase sustentável limitando o seu ritmo de esgotamento ao ritmo de criação de substitutos renováveis. Sempre que possível deverá ser feita a reutilização e a reciclagem dos resíduos resultantes da utilização de recursos não renováveis. Os resíduos de algumas actividades económicas podem em muitos casos servir como matérias-primas de outras actividades.

A actividade económica, o meio ambiente e o bem-estar global da sociedade formam o tripé básico no qual se apoia a ideia de desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável só pode ser alcançado se estes três eixos evoluírem de forma harmoniosa [18].



**Figura 2.2** - Dimensão ambiental, económica e social do desenvolvimento sustentável [18].

É também importante ter em conta estes pontos:

- O desenvolvimento sustentável vai para além da conservação ambiental;
- O desenvolvimento sustentável apela a mudanças estruturais a longo prazo na economia e no sistema social, com o objectivo de reduzir o consumo dos recursos naturais, mantendo o potencial económico e a coesão social [18].

O objectivo de uma política de sustentabilidade energética prende-se com o facto de:

- Melhorar a eficiência energética, com o objectivo de atenuar o crescimento da procura de energia;
- Maximizar o uso dos recursos renováveis, para conseguir dar resposta à satisfação da procura;
- Fixar o CO<sub>2</sub>.

Relativamente à fixação do CO<sub>2</sub> é um aspecto ainda em estudo que tem como objectivo permitir a utilização de combustíveis fósseis, minimizando os impactos negativos associados às emissões de CO<sub>2</sub>.

Relativamente aos edifícios, para que a sustentabilidade energética possa vir a ser uma realidade, embora nem sempre alcançável, deve ser realizada uma auditoria com vista ao estudo sobre o potencial de poupança energética no mesmo, pois os “desperdícios” ao nível de utilização de energia são muito frequentes e muito importantes para atingir o objectivo [19].

Como os efeitos negativos provocados pelo mau uso, e uso de energias provenientes de combustíveis fósseis começam a ser percebidos, a procura pela eficiência energética e pela utilização de energias renováveis começa a aumentar substancialmente [20].

Por isso em edifícios deve-se:

- Por um lado, promover a melhoria da eficiência energética nos edifícios, ou a utilização racional de energia (URE), cobrindo todos os tipos de consumo, desde a preparação de água quente sanitária (utilização básica de maior consumo nos edifícios residenciais), passando pela iluminação e pelos equipamentos e electrodomésticos, sem esquecer a melhoria da



envolvente, tendo em conta o impacto desta nos consumos de climatização (aquecimento, arrefecimento e ventilação) para assegurar o conforto ambiente;

-Por outro lado, promover o recurso às energias endógenas nos edifícios, criando os meios e instrumentos que facilitam a penetração das energias renováveis (solar térmico, solar fotovoltaico, etc.) e das novas tecnologias energéticas (micro-eólicas, células de combustível), incluindo o estabelecimento das condições para a ligação destes pequenos produtores de electricidade em baixa tensão à rede eléctrica nacional [21].

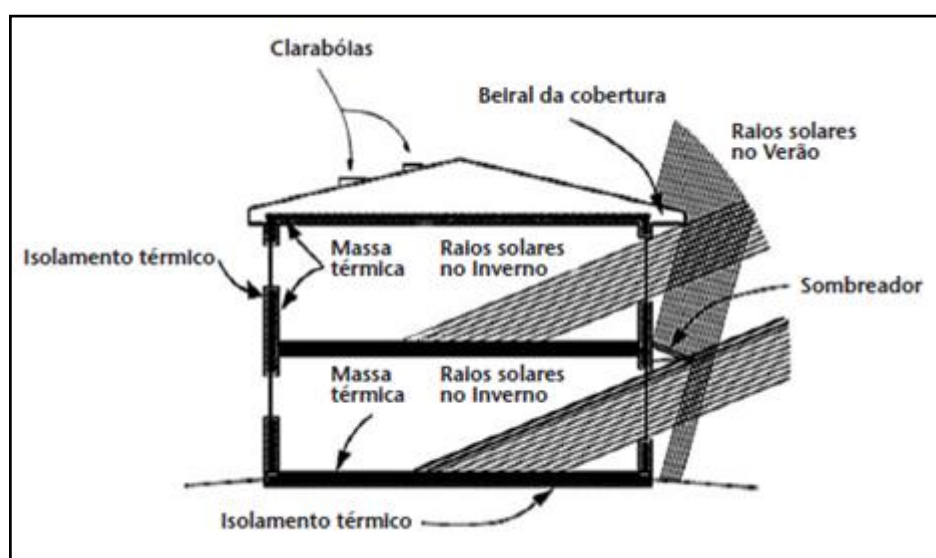
Muitas medidas de eficiência energética, quando aplicadas, traduzem-se também numa melhoria do ambiente interior do edifício, aumentando assim os seus níveis de conforto [20].

Mesmo pequenas mudanças nos hábitos de utilização significam aumentos consideráveis na poupança na factura energética e em termos ambientais [20].

Um edifício energeticamente eficiente é um edifício que fornece os serviços necessários e a qualidade ambiental dentro do mesmo através de uma utilização de energia mínima e consequente redução significativa ao nível de custo. Isto significa que não pode existir um conflito entre eficiência energética e conforto [22].

Deste modo o consumo energético depende das condições de conforto que os ocupantes querem atingir, se o edifício estiver pouco adaptado ao clima local será necessário um maior consumo de energia para atingir as condições de conforto térmico pretendido. Contudo, se na concepção forem utilizadas as estratégias bio-climáticas correctas, o edifício fica mais próximo de atingir as condições de conforto térmico e diminuir os respectivos consumos energéticos.

O conjunto de estratégias a adoptar para a criação de edifícios sustentáveis, são um conjunto de regras ou medidas de carácter geral, destinadas a influenciar a forma do edifício, bem como os seus processos, sistemas e componentes construtivos [23].



**Figura 2.3** - Aspectos construtivos essenciais para um edifício sustentável com a fachada principal virada a sul [18].

A oportunidade para implementar medidas de eficiência energética depende em parte da localização do edifício, e do design do mesmo, devendo aquando da construção de um novo edifício dar preferência a locais com bons recursos a nível solar e eólico sempre que possível [20].

## 2.2. ZEB (Zero Energy Building)

Existem pelo menos três definições principais de ZEB que se encontram em uso nos dias de hoje:

- “**net zero energy building**” - é um edifício que produz tanta energia primária quanto a que necessita. Este sistema inclui o edifício, o sistema de transmissão, a central de produção e a energia necessária para realizar o transporte do combustível para a central;

- “**net zero site energy building**” - é um edifício que produz tanta energia final quanto a que necessita quando medida no local. Este sistema é desenvolvido em torno do edifício;

- “**net zero emissions building**” - é um edifício que tem em conta as emissões que foram produzidas pelo uso de energia no edifício, o que representa uma perspectiva adequada para lidar com as preocupações inerentes ao aquecimento global [24].

Os edifícios têm um impacto significativo sobre a utilização da energia e do ambiente. Edifícios comerciais e residenciais utilizam quase 40% da energia primária disponível. A energia utilizada pelo sector da construção continua a aumentar, principalmente porque os novos edifícios são construídos mais rapidamente do que é efectuada a substituição dos edifícios mais antigos e menos eficientes [25].

Como se encontra previsto que o consumo de energia no sector imobiliário vai continuar a aumentar, torna-se necessário que os edifícios possam ser concebidos para produzir energia suficiente para compensar o aumento da procura energética destes edifícios [25].

Na essência do conceito ZEB, encontra-se a ideia de que os edifícios podem satisfazer todas as suas necessidades energéticas a um baixo custo, disponíveis localmente e produzidas através de fontes renováveis.

O objectivo ZEB pode ser atingido com recurso a diferentes soluções, umas mais onerosas outras menos. É portanto necessário identificar o conjunto de soluções que conduz à consecução deste objectivo com o menor custo (“cost-effective ZEB”).

As linhas gerais do conjunto de soluções conduzem ao “cost-effective ZEB”, baseiam-se em experiências profissionais e consistem em:

- Em primeiro lugar, na exploração de todas as soluções “razoáveis” de eficiência energética (“demand-side management”), com o objectivo de conduzir à redução das necessidades energéticas do edifício;

- Seguidamente, na integração de energias renováveis para supressão dos consumos que resistirem ao esforço de eficiência referido no primeiro ponto (“supply-side management”).

De entre as fontes de energias renováveis possíveis de integrar em edifícios, destacam-se o solar térmico, o solar fotovoltaico e o micro eólico [26].

### Interligação com a rede - Balanços Energéticos

Um ZEB geralmente utiliza as fontes de energia convencionais como é o caso do gás natural e da electricidade proveniente da rede quando a produção eléctrica no local de consumo não consegue atender as cargas.

Do mesmo modo, quando a produção local é maior do que as cargas do edifício, o excesso de energia pode ser exportado para a rede.

Conseguir conceber um ZEB sem a interligação com a rede é bastante difícil pois os actuais avanços nas tecnologias de armazenamento são ainda bastante limitados e dispendiosos.

É importante que a produção de energia a partir de recursos renováveis seja sobredimensionada, pois, especialmente durante o Inverno as produções podem não atingir as potências instaladas. Em muitos casos (principalmente durante o Verão), o excesso de energia gerada pode não ser utilizado, logo poderá ser enviado para a rede, mas é necessário ter também em atenção que nem sempre existe procura por parte da rede, o que releva a importância da existência de sistemas de armazenamento para estes excessos [22].



**Figura 2.4** - Exemplo de uma maqueta de um ZEB [27].

## Capítulo 3

### Microgeração Fotovoltaica

O crescimento da indústria fotovoltaica tem sido bastante acentuado nos últimos anos. Este facto deve-se principalmente ao aumento da procura de energias renováveis e também ao aparecimento de novos investidores e empresas no sector.

#### 3.1. Situação Actual da Energia Fotovoltaica

##### 3.1.1. Situação Internacional

Em 2007, a produção de electricidade, com base em sistemas fotovoltaicos atingiu um máximo de 2.826 MW, o que representa um crescimento na ordem dos 60% comparativamente a 2006.

No Mundo é importante salientar a posição da Alemanha, isto é, a sua produção atingiu 1.328 MW, representando 47% do mercado global. Em termos de evolução, a Espanha salienta-se pois produziu 640 MW, representando um crescimento de 480% face ao ano anterior.

Do total de potência instalada na Europa, destacam-se a Alemanha (representa cerca de 60%), a Espanha (cerca de 35%) e a Itália (cerca de 2,3%) [28].

Os Estados Unidos aumentaram a sua produção em 57%, situando-se em 220 MW e o Japão diminuiu a sua contribuição no mercado em cerca de 23% face a 2006 [29].

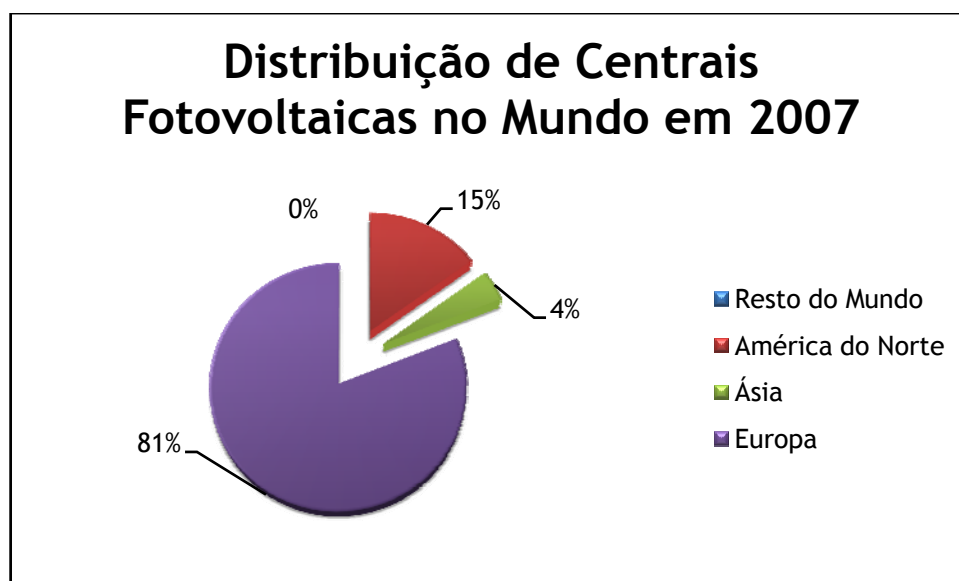


Figura 3.1 - Distribuição de centrais fotovoltaicas no mundo [30].

A Europa tem sido o principal investidor nas centrais de larga escala, sendo o continente com o maior número de instalações deste tipo como se pode verificar pela figura 3.1.

Um bom exemplo da produção distribuída por países mais representativos encontra-se representado na figura 3.2.

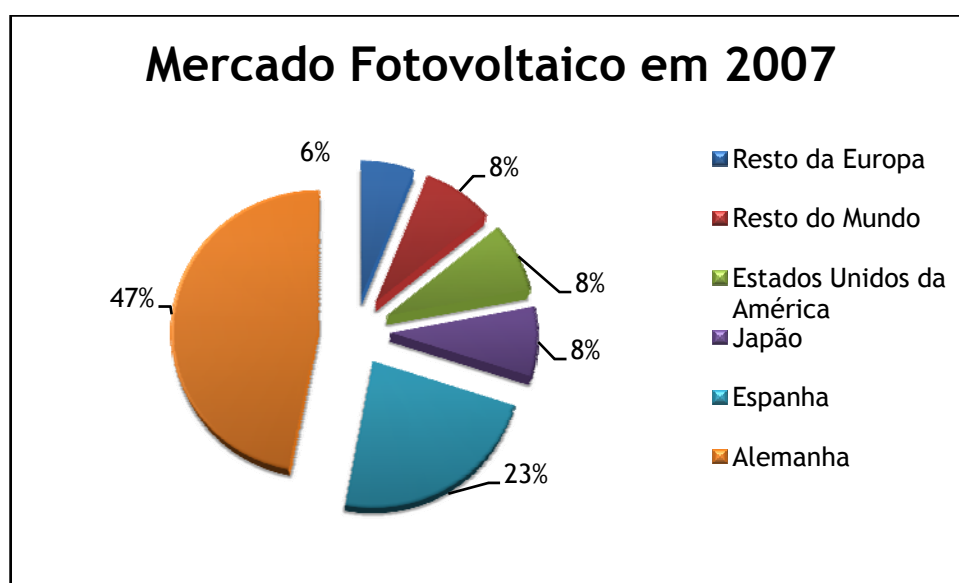


Figura 3.2 - Produção FV a nível mundial referente ao ano de 2007 [30].

Em termos de crescimento de produção, numa base anual verifica-se um elevado crescimento, muito devido à construção de centrais de larga escala ( $P_{inst} > 10$  MWp).

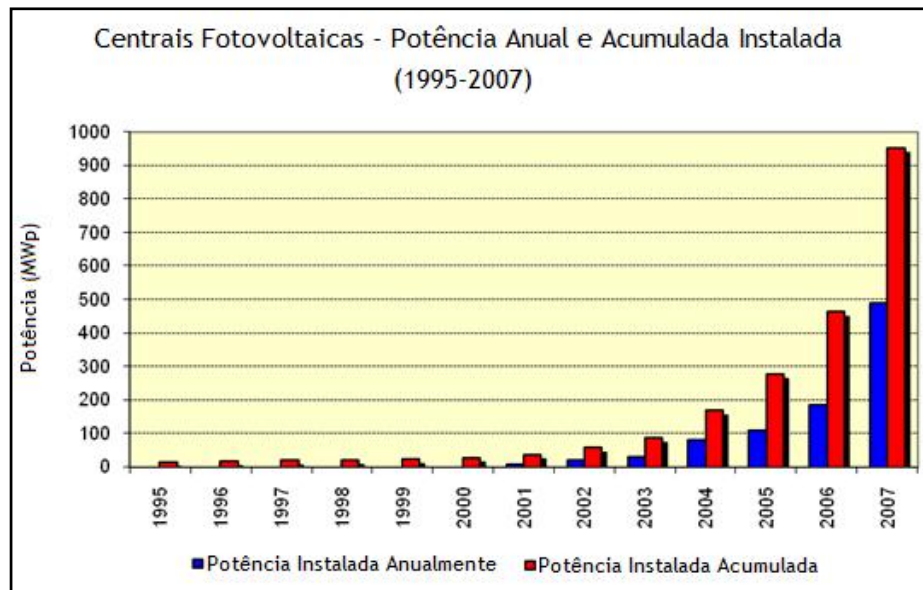


Figura 3.3 - Crescimento anual da potência instalada [28].

A tabela 3.1 apresenta a distribuição das maiores centrais fotovoltaicas do mundo colocadas em funcionamento até ao dia 31-12-2007 [28].

Tabela 3.1 - Distribuição das maiores centrais fotovoltaicas no Mundo [28].

Potência (MWp)	País
20	Espanha
20	Espanha
14	Estados Unidos da América
13,8	Espanha
12,7	Espanha
12	Alemanha
11	Portugal
10,35	Alemanha
10	Alemanha
9,55	Espanha
8,76	Espanha
8,4	Alemanha
8,22	Estados Unidos da América
6,3	Alemanha
6,277	Espanha
6	Espanha
6	Alemanha
5,8	Espanha
5,56	Alemanha
5,27	Alemanha

5,21	Japão
5,076	Alemanha
5,04	Espanha
5	Alemanha
5	Espanha

### 3.1.2. Situação em Portugal

Na União Europeia, Portugal é, depois da Grécia e da Espanha, o país com maior potencial de aproveitamento de energia solar. Com mais de 2300 horas/ano de insolação na região Norte, e 3000 horas/ano no Algarve, o nosso país dispõe de uma situação privilegiada para o desenvolvimento deste tipo de energia [31].

A produção de electricidade através de sistemas fotovoltaicos tem vindo a evoluir significativamente desde 2003. No início do ano as estatísticas apontavam para uma potência instalada a rondar os 2 MWp, sendo importante referir que apenas 20% se referem a instalações ligadas à rede pública.

Decorrido um ano, 2004, a potência instalada aumentou para 2,6 MWp, que representa um aumento de 30%.

Portugal representa cerca de 1% do total de potência instalada na Europa [28].

A procura por grandes centrais aumentou e os projectos também. Em 2007 foram construídas duas centrais dignas de relevo mais concretamente:

-Em Março, foi inaugurada em Brinches, concelho de Serpa, uma central com 11 MWp, projectada e construída pela *Power Light Corporation*, sendo constituída por 52 mil painéis “espalhados” por uma área útil de 60 hectares;

-Em Junho, entrou em funcionamento a central de Pão de Água, no concelho de Mértola com uma potência instalada de 756 kWp, projectada e construída pela empresa Jayme da Costa, constituída por 12.600 painéis de silício amorfo.

Em 17 de Março de 2008, deu-se um marco importante no nosso país, pois entrou em funcionamento a maior central do mundo, a central da Amareleja, no concelho de Moura. Inicialmente o projecto possuía uma potência instalada igual a 62MWp, mas após novos estudos optou-se por instalar seguidores solares que permitiram uma redução de 62 para 42 MWp, pois com este sistema a produção é igual à obtida com 62 MWp usando sistemas fixos. Até ao final de 2008 previa-se que a central atingisse a sua capacidade total de produção pois numa primeira fase a central encontrava-se apenas a produzir uma pequena parcela da sua capacidade total.

Em Abril de 2008, foi parcialmente ligada uma nova central fotovoltaica em Mértola. Esta central encontrava-se projectada e prevista para Freixo de Espada à Cinta, mas a maior incidência de radiação em Mértola ditou a alteração do local da instalação. A sua potência é de 2 MWp, sendo constituída por 16.200 painéis policristalinos. Foi projectada pela Jayme da Costa e ainda se encontra numa fase de construção.

É de salientar a aprovação pelo Ministério da Economia e da Inovação para a execução de projectos de outras centrais, nomeadamente: Albufeira (10 MWp), Lisboa (6 MWp) e Ourique (2 MWp) [32].

### 3.2. Considerações Gerais

Ao longo dos últimos anos verificou-se que os sistemas fotovoltaicos se foram afirmando no mercado da produção de energia eléctrica como uma alternativa bastante forte aos combustíveis fósseis. Uma das principais causas para a existência desta afirmação relaciona-se com a descida de preços deste tipo de sistemas, por força da pesquisa e optimização da tecnologia. Esta descida de preços permitiu que a energia fotovoltaica passasse a ser considerada economicamente viável.

Um sistema fotovoltaico acarreta comparativamente aos sistemas convencionais vantagens e desvantagens: [33]

#### Vantagens dos Sistemas Fotovoltaicos

- Alta fiabilidade - não tem peças móveis, o que é muito útil em aplicações em locais isolados e funcionam mesmo em condições exigentes;
- Durabilidade - o tempo médio de vida é cerca de 25 anos e a garantia oferecida pelo fabricante é igual ou superior a 25 anos;
- Fácil portabilidade e adaptabilidade dos módulos - permitem montagens simples e adaptáveis a várias necessidades energéticas. Os sistemas podem ser dimensionados para aplicações de alguns miliWatts ou de kilowatts, e é muito simples passar de miliwatts para kilowatts um sistema devido à sua modularidade;
- O custo de operação é reduzido - a manutenção é quase inexistente: não necessita de combustível, transporte, nem trabalhadores altamente qualificados;
- A tecnologia fotovoltaica apresenta qualidades ecológicas pois o produto final é não poluente e não perturba o ambiente.

#### Desvantagens dos Sistemas Fotovoltaicos

- O fabrico dos módulos fotovoltaicos necessita de tecnologia muito sofisticada necessitando de um custo de investimento elevado;
- O rendimento real de conversão de um módulo é reduzido (o limite teórico máximo numa célula de silício cristalino é de 24%) face ao custo do investimento.
- É necessário um local com boa radiação solar para rentabilizar o investimento;
- Os geradores fotovoltaicos raramente são competitivos do ponto de vista económico, face a outros tipos de geradores. A excepção restringe-se a casos onde existam reduzidas necessidades de energia em locais isolados e/ou em situações de grande preocupação ambiental;
- Quando é necessário proceder ao armazenamento de energia sob a forma química (baterias), o custo do sistema fotovoltaico torna-se ainda mais elevado.

### 3.3. Radiação Solar

A maior fonte de energia disponível na Terra provém do Sol. A energia solar é indispensável para a existência de vida na Terra, sendo o ponto de partida para a realização



de processos químicos e biológicos. Por outro lado, a energia proveniente do Sol é das mais “amigas do ambiente”, podendo ser utilizada de diversas maneiras [34].

Deste modo, pode-se concluir que uma das fontes endógenas de extrema importância é a energia solar dado que o valor anual da radiação solar global varia entre 1400 e 1800 kWh/m<sup>2</sup> [34].

### 3.3.1. Radiação Solar - Definição

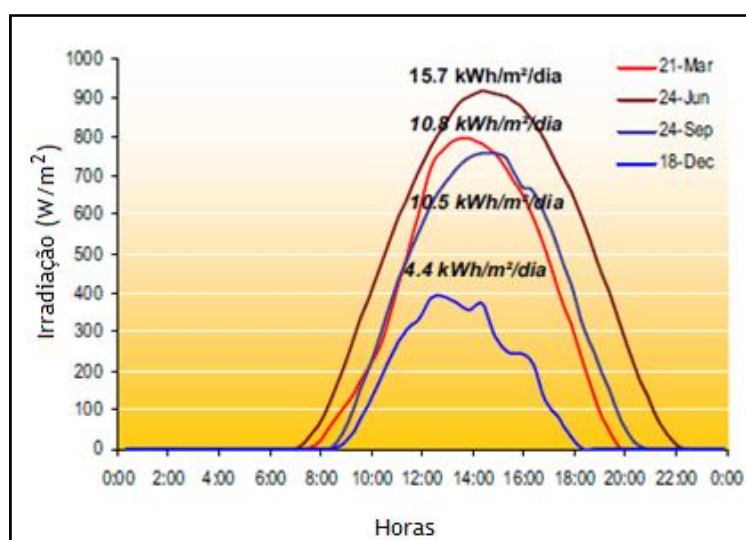
“**Radiação solar** é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular, aquela que é transmitida sob a forma de radiação electromagnética” [35].

A intensidade da radiação solar fora da atmosfera, depende da distância entre o Sol e a Terra. Durante o decorrer do ano, pode variar entre 1,47 x 10<sup>8</sup> km e 1,52 x 10<sup>8</sup> km. O valor médio é designado por constante solar,  $E_0 = 1.353 \text{ W/m}^2$ .

No entanto, apenas uma parte da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre. A atmosfera reduz a radiação solar através da reflexão, absorção (ozono, vapor de água, oxigénio, dióxido de carbono) e dispersão (partículas de pó, poluição) [34].

A radiação solar média em Portugal é 1500 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Assumindo uma eficiência de conversão de 15% temos 225kWh/m<sup>2</sup>/ano de electricidade solar. Como o consumo nacional é da ordem de 4.5 x 10<sup>10</sup> kWh/ano, seriam precisos 200km<sup>2</sup> de painéis solares para produzir toda essa electricidade. Dividindo pelo número de habitantes significa 20m<sup>2</sup> de painéis solares por habitante (incluindo não só o consumo doméstico mas também o consumo de electricidade na indústria e nos serviços) [36].

Tendo como base os dados astronómicos verifica-se que a energia solar disponível na Terra é muito variável. Para uma localização pré-estabelecida, esta variação depende da latitude geográfica, do dia e do ano. Devido à inclinação do eixo da Terra os dias de Verão são maiores que os dias de Inverno, e as altitudes solares que o Sol atinge são mais elevadas nos meses de Verão do que no Inverno [34].



**Figura 3.4** - Irradiação solar diária em Lisboa numa placa horizontal de superfície de 1 m<sup>2</sup> para 4 dias no ano [34].

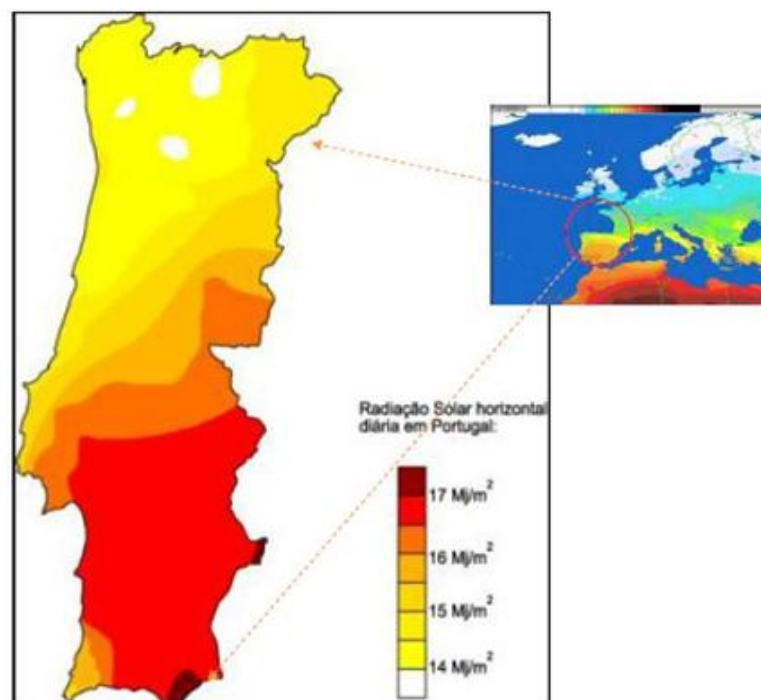


Figura 3.5- Distribuição da radiação solar diária em Portugal em plano horizontal [37].

### 3.3.2. Radiação Directa e Difusa

A luz solar que atinge a superfície terrestre é composta por uma fracção directa e por uma fracção difusa. A radiação directa vem segundo a direcção do Sol, produzindo sombras bem definidas em qualquer objecto. Por outro lado, a radiação difusa, que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó carece de direcção específica. A radiação difusa inclui também a radiação reflectida pela superfície terrestre (radiação do Albedo).



Figura 3.6 - Representação das componentes da radiação solar [34].

Em termos gerais, verifica-se que em dias claros, a fracção da radiação directa prevalece, no entanto, na maioria dos dias cobertos de nuvens (especialmente no Inverno), a radiação solar é quase completamente difusa. Em Portugal, a proporção da radiação solar difusa durante um ano, é cerca de 40 % para 60 % de radiação directa [34].

A soma da radiação difusa e directa equivale à radiação solar global.

### 3.3.3. Posição do Sol

O conhecimento exacto da localização do Sol, é necessário para determinar os dados de radiação e a energia produzida pelas instalações solares. A localização do Sol pode ser definida em qualquer local, pela sua altura e pelo seu azimute. No campo da energia solar, o Sol é referido geralmente como  $\alpha = 0^\circ$ .

O símbolo negativo é atribuído aos ângulos orientados a Leste (Este:  $\alpha = -90^\circ$ ) e o símbolo positivo aos ângulos orientados a Oeste (Oeste:  $\alpha = 90^\circ$ ) [38].

O azimute é o ângulo que a projecção do Sol faz com a direcção Norte enquanto a altura solar é o ângulo que o Sol faz com o plano horizontal [39].

A altura é o ângulo que a direcção com que se vê o Sol faz com o plano do horizonte [39].

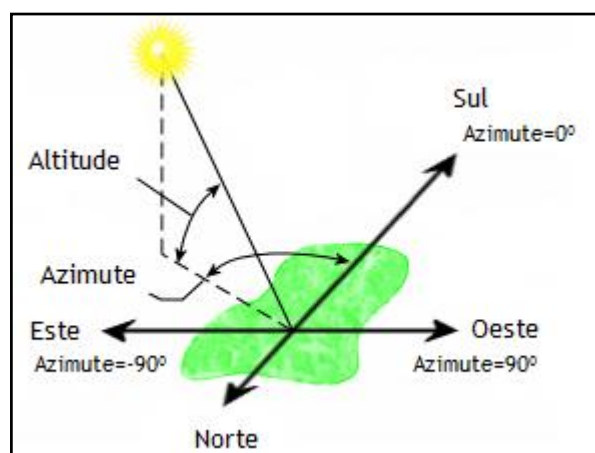


Figura 3.7 - Altura e azimute solar [40].

A distância entre o Sol e a Terra varia ao longo das quatro estações do ano, devido à forma elíptica da órbita da Terra. Este fenómeno tem como consequência uma variação na altura do Sol, sendo este facto relevante para o projecto e optimização dos sistemas fotovoltaicos.

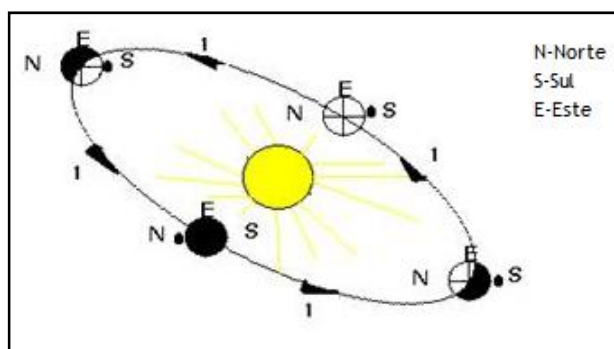


Figura 3.8 - Órbita da Terra.

Deste modo, pode-se concluir que um sistema fotovoltaico é, na maioria das vezes, dimensionado para uma estação ou mês específico, com o objectivo de garantir uma produção de electricidade mínima, quando dimensionado para o mês mais desfavorável, ou máxima quando dimensionado para o mês mais favorável.

### 3.3.4. Orientação Solar

A quantidade de electricidade produzida por uma unidade fotovoltaica está directamente relacionada com a radiação solar disponível. Assim, quanto maior for a disponibilidade do recurso solar maior será o potencial de produção de electricidade.

Logo, a inclinação dos painéis deve tentar otimizar ao máximo a captação de radiação solar tendo em conta a variação da altura e do azimuth solar ao longo do ano como se encontra representado na figura 3.9.

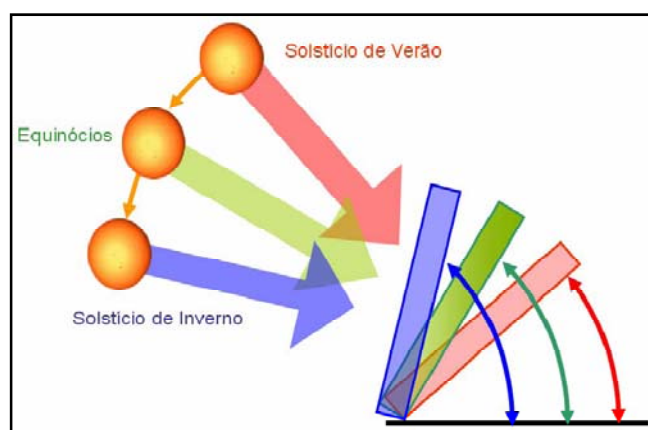


Figura 3.9 - Diferentes inclinações para diferentes alturas do ano [41].

A orientação que maximiza a quantidade de radiação aproveitável coincide com o Sul geográfico.

O ângulo de inclinação óptimo para os painéis é um valor próximo da latitude do local da instalação [41].

Em Portugal estes sistemas deverão ser direccionados para sul com um ângulo de montagem de aproximadamente 38 graus [42].

Para o Porto, o ângulo de montagem é aproximadamente 35 graus resultante da latitude (40,1 graus) menos 5 graus [41].

A inclinação dos painéis também se encontra dependente do tipo de instalação a que se destina o sistema:

- Sistema ligado à rede - a inclinação óptima corresponde à latitude menos 10°;
- Sistema isolado - a inclinação óptima corresponde à latitude mais 20°.

A integração destes sistemas em edifícios, tais como, fachadas ou telhados, adoptando a inclinação dos mesmos, implica uma distribuição de radiação solar inferior ao valor óptimo, logo a energia produzida é menor.

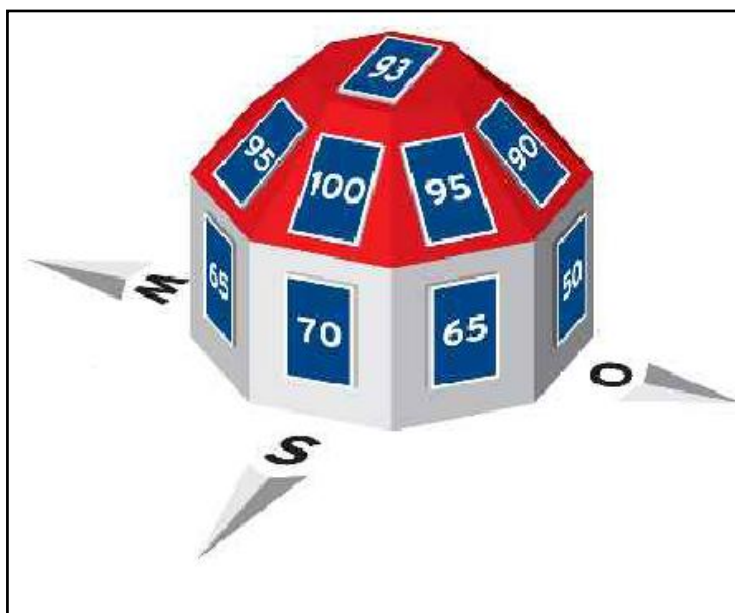


Figura 3.10 - Variação da produção com o posicionamento do painel [43].

### 3.4. Células Fotovoltaicas

#### 3.4.1. Efeito Fotovoltaico e MPPT (“Maximum Power Point Tracking”)

O efeito fotovoltaico, transformação da energia solar “fotão” em energia solar “volt” foi descoberto em 1839 pelo físico A. Becquerel.

Este fenómeno engloba 3 fenómenos físicos intimamente ligados e simultâneos:

- A absorção da luz pelo material;
- A transferência de energia dos fótons para as cargas eléctricas;
- A criação de corrente eléctrica [44].

### MPPT - Maximum Power Point Tracking

As células fotovoltaicas apresentam grandes variações de potência eléctrica em função das condições meteorológicas. Além disso, quando estão ligadas a uma carga surgem outros problemas que fazem com que a energia transferida para a carga raramente corresponda à energia máxima produzida pelo gerador FV [45].

Os controladores de "Maximum Power Point Tracking" (MPPT) foram desenvolvidos após 1968, com o intuito de melhorar o desempenho do sistema constituído por uma fonte não linear e uma carga arbitrária. Este tipo de controladores está particularmente adaptado para regular fontes não lineares e forçá-las a trabalhar no ponto de potência máxima, resultando, assim, uma melhoria global do rendimento da conversão em energia eléctrica [44].

Quando se liga uma fonte de energia a uma carga, o ponto de funcionamento é determinado pela intersecção da característica eléctrica tensão-corrente da fonte, com a correspondente característica da carga. Este ponto de funcionamento altera-se sempre que as características da fonte, ou da carga se alteram. Esta é a razão porque, muito frequentemente, não se está a operar a MPP e a energia fornecida à carga é inferior à máxima que poderia ser fornecida [45].

Existem diferentes tipos de controladores MPPT; regra geral, cada um destes tipos foi desenvolvido para uma aplicação específica. A precisão e a robustez destes controladores dependem de um certo número de parâmetros:

- Rendimento global do sistema desejado pelo construtor;
- Tipo de inversor que faz a adaptação e a ligação à carga, ou à rede eléctrica;
- Aplicação em vista (sistemas autónomos ou ligados à rede) [44].

### 3.4.2. Tipos de Células

O material que normalmente é usado nas células fotovoltaicas é o silício (é o segundo elemento mais abundante na superfície do nosso planeta), semicondutor do tipo IV. Também é frequente usar-se o arsenieto de gálio, camadas finas de CdTe (telureto de cádmio), o CIS (cobre, índio, selénio) e ainda o CIGS (cobre, índio, gálio, selénio) [33].

É importante referir que estas tecnologias alternativas têm vindo a aumentar a sua parcela no mercado fotovoltaico.

As células fotovoltaicas dividem-se então em 4 grupos: [33]

-Células monocristalinas (c-Si) - representam a primeira geração, e as técnicas utilizadas na sua produção são bastante complexas e dispendiosas, acrescendo o facto de ser necessária uma quantidade bastante elevada de energia no seu fabrico;

-Células policristalinas (c-Si) - o seu custo de fabrico é bastante inferior às monocristalinas porque a energia necessária para o seu fabrico é menor. Por outro lado, devido à imperfeição do cristal (resultante do sistema de fabrico) o seu rendimento é mais reduzido;

-Células amorfas (a-Si) - são películas muito finas (mais conhecidas por filmes finos), o que permite que sejam utilizadas como material de construção e o seu custo é ainda mais reduzido que os dois tipos descritos anteriormente, mas em contrapartida o seu rendimento também é mais reduzido;

-Células CdTe, CIS, CIGS - este tipo de células ainda se encontram em fase de desenvolvimento e industrialização.

Tabela 3.2 - Quadro representativo dos rendimentos dos diferentes tipos de células [46].

Tecnologia	Silício Cristalino		Película Fina	
	Monocristalino	Policristalino	Silício Amorfo	Celulas CdTe, CIS, CIGS
Rendimento típico	12%-15%	10%-14%	6%-7%	6%-9%
Máximo registado em aplicações	22,7%	15,3%	10,2%	---
Rendimento máximo registado em laboratório	24%	18,6%	12,7%	10%
Área necessária por kWp (painéis)	8 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>

A distribuição das diversas tecnologias no mercado encontra-se representada na figura 3.11.

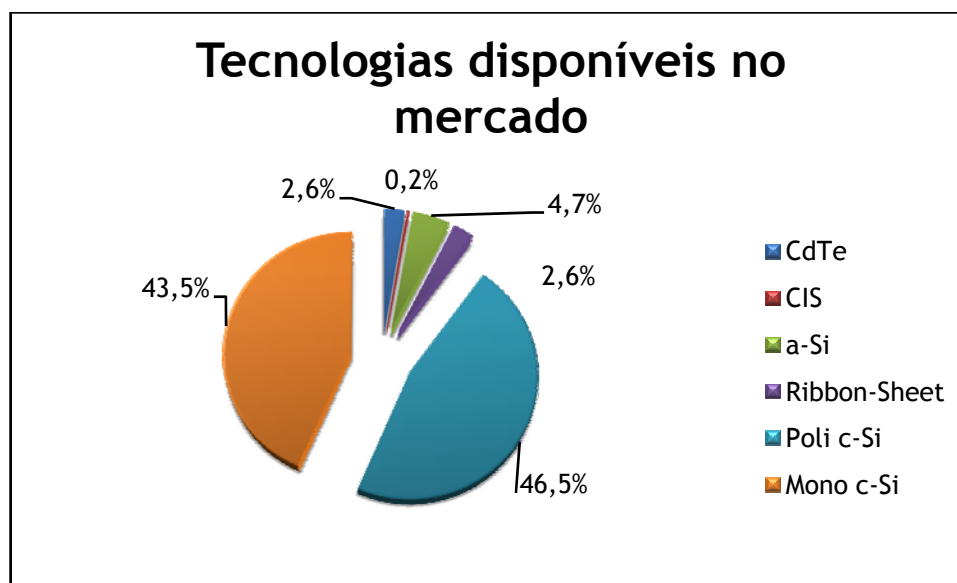


Figura 3.11 - Representatividade de cada tecnologia no mercado global [28].

#### 3.4.2.1. Tipos de Instalações

Os sistemas fotovoltaicos possuem diversos tipos de aplicações relativamente a edifícios, nomeadamente, instalações em coberturas e fachadas, sem considerar “Building Integrated Photovoltaic” (BIPV).

Relativamente às coberturas, os painéis podem ser aplicados em estruturas fixas ou estruturas de seguimento solar, isto é, estruturas que seguem a orientação solar segundo um ou dois eixos de modo a otimizar a radiação incidente no mesmo.

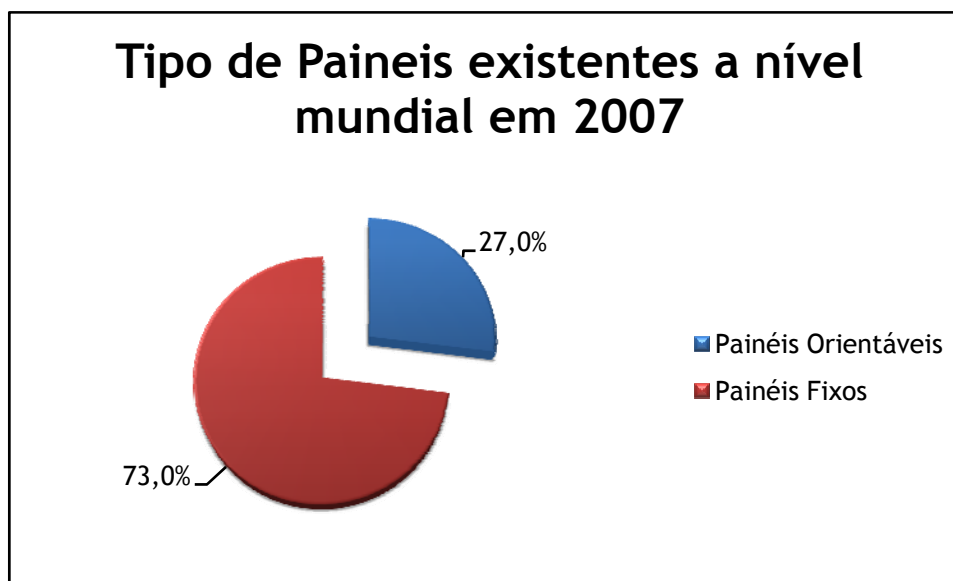


Figura 3.12 - Tipos de paineis a nível mundial referentes ao último semestre de 2007 [28].

De entre estes tipos de instalações 70% encontravam-se instalados no solo, 29% nas coberturas de edifícios e os restantes 1% em aplicações variadas.



Figura 3.13 - Instalação de sistemas fotovoltaicos mediante o local no final de 2007 [28].



### 3.5. Constituintes de um Sistema Fotovoltaico

#### 3.5.1. Painéis ou Módulos Fotovoltaicos

A produção de energia eléctrica a partir da radiação solar tem como base as células fotovoltaicas. Uma célula individual, unidade de base de um sistema fotovoltaico, produz apenas uma reduzida potência eléctrica. Para disponibilizar potências mais elevadas, as células são integradas, formando um módulo (ou painel) [38].

Esta junção das células é feita por ligações em série ou em paralelo.

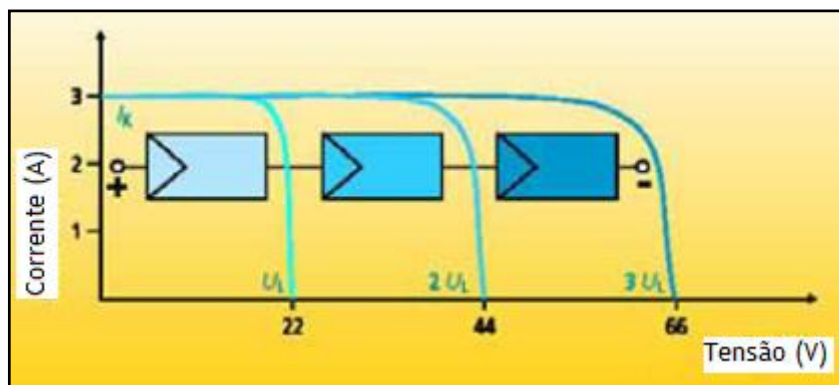


Figura 3.14 - Ligação em série de três módulos fotovoltaicos [38].

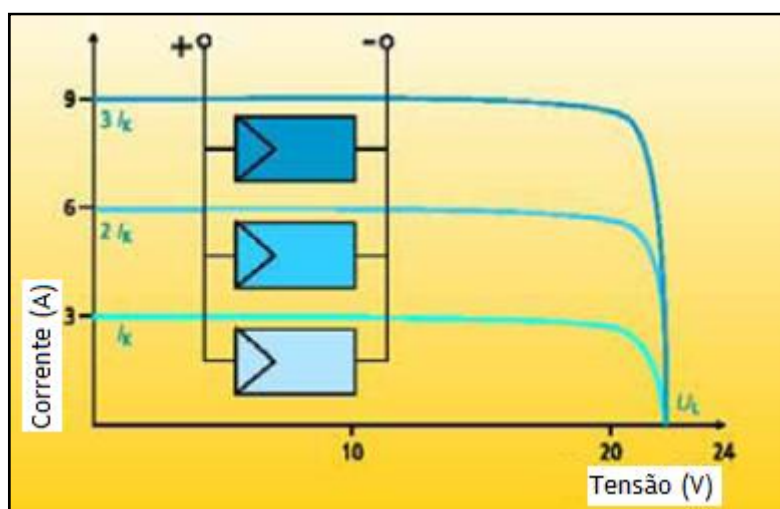


Figura 3.15 - Ligação em paralelo de três módulos fotovoltaicos [38].

As ligações em série aumentam a tensão de saída e mantêm constante a corrente. Por seu lado a ligação em paralelo permite aumentar a corrente eléctrica [33].

Os principais componentes da célula fotovoltaica correspondem às camadas de materiais semicondutores onde é produzida a corrente eléctrica. Além dos materiais semicondutores, a célula fotovoltaica apresenta dois contactos metálicos, em lados opostos, para fechar o circuito eléctrico. O conjunto encontra-se encapsulado entre um vidro e um fundo, essencialmente para evitar a sua degradação provocada pelos factores atmosféricos - vento, chuva, poeira, vapor [47].

Encontram-se geralmente 3 tipos de painéis solares:

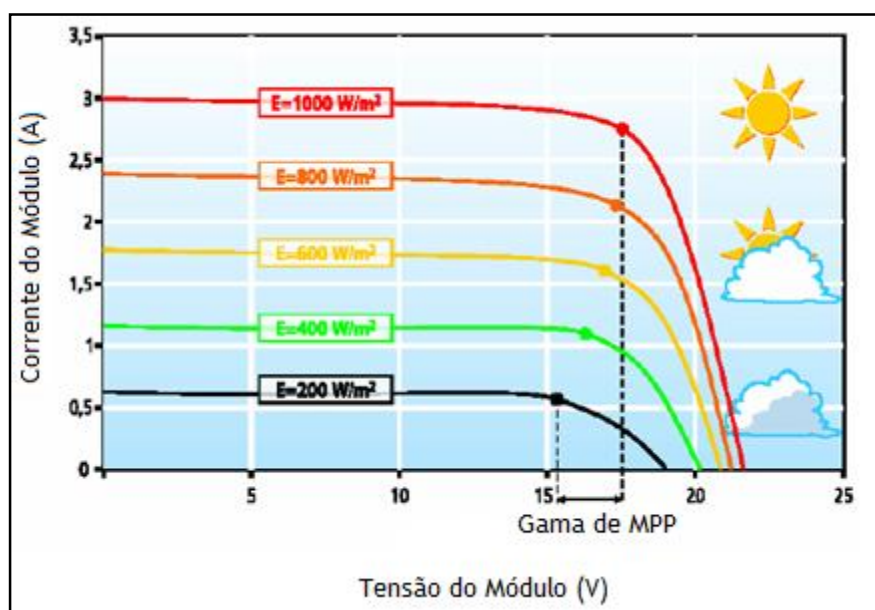
- Painéis de baixa voltagem/baixa potência - feitos de 3 até 12 pequenos segmentos com uma superfície total de alguns centímetros quadrados. A voltagem encontra-se entre 1,5 e 6 Volt, e a potência de alguns miliWatts. A sua aplicação é frequente em relógios e calculadoras;

- Pequenos painéis - de 1-10W e 3-12 Volt. A sua aplicação é frequente em rádios, jogos e pequenas bombas de água;

- Grandes painéis - de 10 a 60 W com uma tensão de 6-12 Volt. A sua aplicação é frequente em grandes bombas de água, caravanas e habitações domésticas.

Um painel ou módulo fotovoltaico possui uma curva característica I-V muito semelhante à das células, apenas variando os níveis de corrente e de tensão. A potência máxima fornecida encontra-se na zona do “joelho” da curva característica, tal como nas células. Deve-se procurar que o painel funcione o mais próximo possível desse ponto (MPPT descrito em 3.4.1).

Considerando um módulo standard de 50 Wp as suas curvas características são apresentadas na figura 3.16 e 3.17.



**Figura 3.16** - Curvas características do painel para diferentes radiações incidentes para um painel de 50Wp [38].

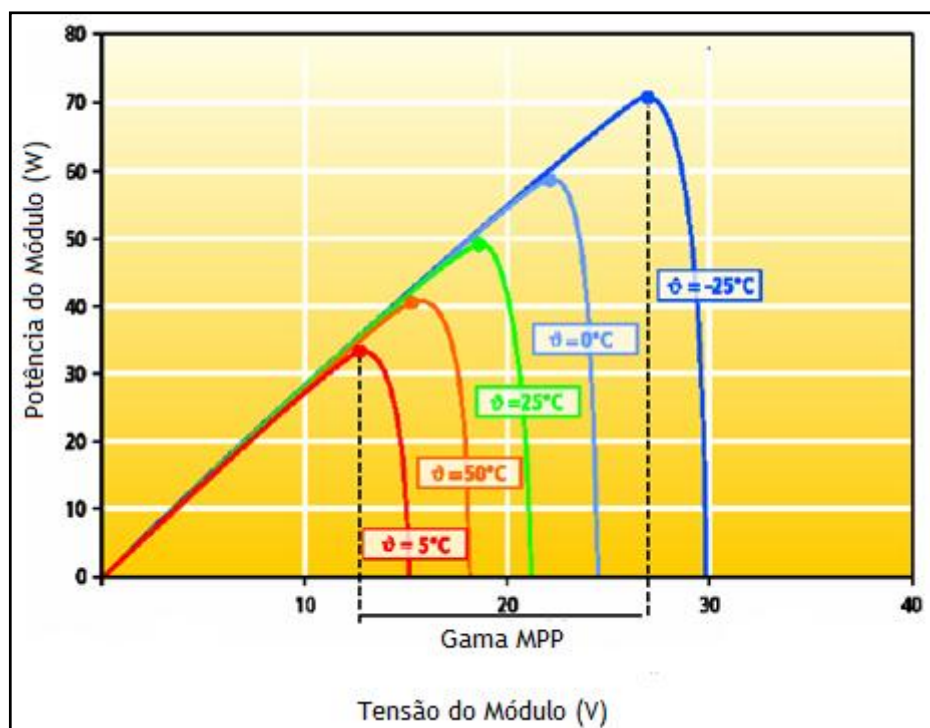


Figura 3.17 - Curvas características do painel para uma radiação de 1000 W/m<sup>2</sup> [38].

O desempenho e as curvas características dos módulos fotovoltaicos, dependem da temperatura das células e da intensidade da radiação incidente, pelo que os módulos funcionam normalmente em regime de carga parcial. A intensidade da corrente que atravessa o módulo, é praticamente proporcional à variação da radiação ao longo do dia. Quando a radiação desce para metade a electricidade produzida reduz-se também para metade [38].

### 3.5.2. Inversores

O inversor estabelece a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede AC ou a carga AC. A sua principal função consiste em converter o sinal DC do gerador fotovoltaico num sinal AC e ajustá-lo para a frequência e o nível de tensão da rede a que está ligado [38].

O tipo de inversor depende do tipo de aplicação a que se destina, sistema ligado à rede - inversor de sincronização ou exterior - ou sistema isolado (autónomo) - inversor autónomo.

Nos sistemas fotovoltaicos com ligação à rede, o inversor é ligado à rede eléctrica de forma directa ou através da instalação do serviço eléctrico do edifício. Com uma ligação directa, a electricidade produzida é injectada directamente na rede eléctrica pública. Com o acoplamento à instalação do edifício, a energia gerada é em primeiro lugar consumida no edifício, sendo então a excedente fornecida à rede pública, ou então, em situação inversa, em caso de falta de energia gerada para satisfazer as cargas, é a energia proveniente da rede que cobre as necessidades.

### 3.5.3. Reguladores de Carga

Os reguladores de carga efectuem a gestão da carga de forma a obter perfis compatíveis com a radiação disponível e com a capacidade das baterias. As principais tarefas de um moderno regulador de carga são as seguintes:

1. Óptima carga do acumulador;
2. Protecção contra sobrecargas;
3. Prevenção de descargas indesejáveis;
4. Protecção contra profundas descargas;
5. Informação do estado da carga [32].

### 3.5.4. Baterias

As características intermitentes de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos conduzem à existência de componentes de armazenamento de energia eléctrica. Os equipamentos utilizados para realizar esta função são as baterias, as quais armazenam a energia eléctrica sob a forma de energia química. As baterias aumentam a fiabilidade do sistema, pois permitem o contínuo fornecimento de electricidade em ocasiões de céu encoberto ou de não produção dos painéis.

Geralmente as baterias mais utilizadas são:

- Ácido de chumbo;
- Alcalinas.

#### **Escolha de Baterias**

A escolha das baterias para um sistema fotovoltaico deve ser criteriosa e ter em atenção certas características, tais como:

- Dias de autonomia;
- Capacidade de armazenamento;
- Taxa de descarga;
- Tempo de vida;
- Gama de Temperatura;
- Manutenção necessária;
- Preço.

A escolha das baterias a utilizar no sistema fotovoltaico deve ter em atenção o sistema a que se destinam e segundo as características apresentadas [29].



## Capítulo 4

# Microgeração Eólica

A origem da energia eólica está no Sol que aquece a superfície da Terra de forma não uniforme. Isso dá origem a que, em zonas de maior impacto solar, o ar aqueça e suba (formando um núcleo de baixas pressões), enquanto o ar frio permanece a menor altitude (altas pressões). É esta diferença de pressões e o consequente deslocamento das massas de ar (das altas para as baixas pressões) que está na origem do vento. O recurso eólico é também influenciado por factores locais, tais como, a rugosidade e a orografia do terreno, entre outros.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). O seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através da aplicação de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de electricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos, como, por exemplo, o bombeamento de água.

### 4.1. Situação Actual da Energia Eólica

#### 4.1.1. Situação Internacional

Em 2002 havia mais de 30 mil aerogeradores em operação no mundo, sendo que em 1991 a Associação Europeia de Energia Eólica estabeleceu como metas a instalação de 4000MW de energia eólica na Europa até ao ano 2000 e 11500MW até o ano 2005. Actualmente as metas são de 75000MW na Europa até 2010 [48].

“A Europa é líder global em energia eólica, mas estamos a testemunhar a globalização dos mercados eólicos” [49].

Tabela 4.1 - Tabela da potência acumulada no final de cada ano (MW) [50].

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano [MW]										
	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
Alemanha	22.247	20.622	18.428	16.628	14.609	12.400	8.754	6.095	4.443	2.875	2.081
Estados Unidos	16.819	11.603	9.149	6.752	6.352	4.685	4.258	2.564	2.534	1.820	1.673
Espanha	15.145	11.615	10.027	8.263	6.202	4.830	3.337	2.535	1.542	834	512
Índia	7.850	6.270	4.430	2.983	2.120	1.702	1.500	1.260	1.035	992	940
China	5.912	2.604	1.260	764	566	468	404	352	262	500	166
Dinamarca	3.125	3.136	3.128	3.118	3.115	2.880	2.534	2.415	1.771	1.383	1.148
Itália	2.726	2.123	1.717	1.265	891	785	697	427	183	178	103
França	2.455	1.567	757	390	240	131	116	63	25	21	10
Reino Unido	2.389	1.963	1.353	897	704	552	483	409	347	333	319
Portugal	2.130	1.716	1.022	523	299	194	153	111	61	51	38
Canadá	1.846	1.459	683	444	326	221	198	137	125	82	25
Holanda	1.747	1.219	1.219	1.078	912	686	497	442	411	361	319
Japão	1.538	1.394	1.040	940	644	415	316	142	68	30	18
Áustria	982	965	819	607	415	139	95	77	42	30	20
Grécia	873	746	573	466	398	276	299	274	158	55	29
Austrália	817	817	572	380	198	104	71	30	9	9	11
Irlanda	805	745	496	353	225	137	125	119	73	73	53
Suécia	789	572	510	442	399	328	290	241	215	174	122
Noruega	333	314	270	160	112	97	17	13	9	9	4
Nova Zelândia	322	171	170	170	38	35	35	35	24	24	4
Egipto	310	230	145	145	69	69	69	69	36	6	5
Bélgica	287	193	167	97	68	44	31	13	6	6	4
Tailândia	280	188	104	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Polónia	276	83	73	58	58	27	51	5	5	5	2
Brasil	247	237	29	29	29	24	24	22	17	17	3
Turquia	207	65	20	20	20	19	19	19	9	9	-
Coreia do Sul	191	173	120	8	8	nd	nd	nd	nd	nd	2
República Checa	116	57	30	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Finlândia	110	82	82	82	47	41	39	39	18	18	12
Ucrânia	89	73	73	57	51	nd	nd	nd	nd	nd	5
México	87	87	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Costa Rica	74	74	71	71	71	71	71	51	51	27	20
Bulgária	70	36	14	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Irão	67	47	32	11	11	11	11	11	11	11	11
Hungria	65	61	18	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Marrocos	64	64	64	54	54	54	54	54	14	nd	nd
Estónia	58	33	33	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Lituânia	52	55	7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Luxemburgo	35	35	35	35	16	16	15	15	9	9	2
Argentina	30	26	26	26	26	27	27	16	14	14	9
Outros Países	285	650	67	239	141	569	337	394	405	197	22
Total	93.850	74.169	58.834	47.555	39.434	32.037	24.927	18.449	13.932	10.153	7.692

#### 4.1.2. Situação em Portugal

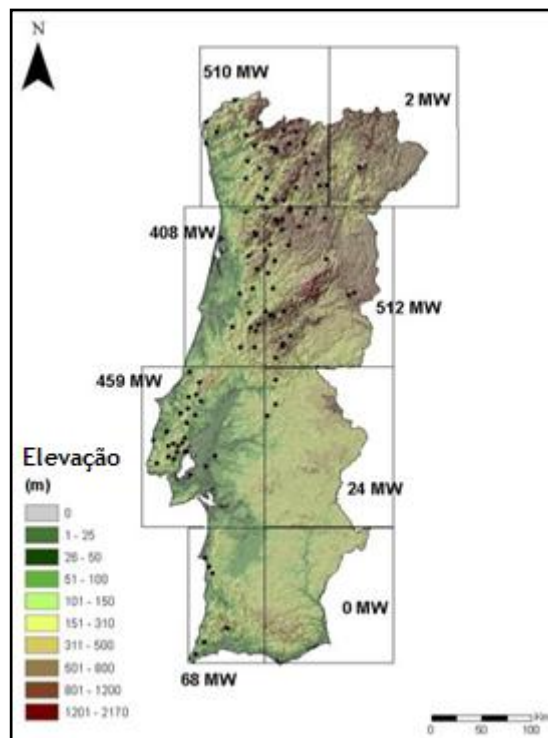


Figura 4.1 - Distribuição da potência eólica em Portugal, final de 2007 [51].

No 1º semestre de 2008, a potência instalada aumentou 276 MW. Desta nova potência, 61% foi instalada no parque do Alto Minho I, que em 31 de Dezembro de 2007 tinha instalados 11 MW e que no final do semestre conta com 180 MW, faltando ainda 60 MW para completar o projecto. Também ligado à rede de transporte, o parque Ventos da Gardunha adicionou 16 MW aos 64 MW instalados no final do ano anterior, faltando somente 3 aerogeradores para a sua conclusão [52].

No final do semestre, encontravam-se em funcionamento 161 parques, dos quais 9 ligados à rede de transporte, com uma potência total de 2244 MW, repartida por 778 MW ligados à rede de transporte e os restantes 1466 MW à rede de distribuição. A potência eólica ligada à rede representa cerca de 16% do total da capacidade instalada no Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [52].



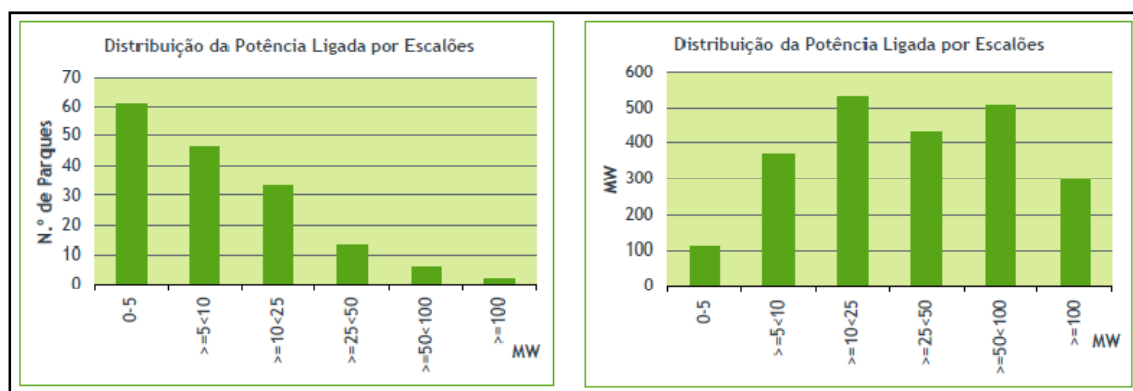


Figura 4.2 - Distribuição da potência ligada por escalões [52].

## 4.2. Recurso Eólico

O vento e a água, em conjunto com os seres humanos e animais, foram as maiores fontes de energia de toda a história conhecida até há um par de séculos atrás. A energia eólica é utilizada há milhares de anos com a mesma finalidade da energia hidráulica, isto é, bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvam a energia mecânica. No séc. XVIII, calcula-se que só a Grã-Bretanha teria cerca de 10.000 moinhos de vento [53].



Figura 4.3 - Exemplo de um moinho de vento [54].

O primeiro gerador comercial ligado à rede eléctrica pública foi instalado em 1976, na Dinamarca.

A avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de recolha e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. Geralmente, uma avaliação rigorosa requer levantamentos específicos, mas através de dados recolhidos em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica [48].

Em Portugal Continental, os recursos em energia eólica superam os recursos conhecidos em energia hídrica mas só poderão ser competitivamente explorados e tornar-se importantes geradores de emprego qualificado se o sector for integrado numa política energética exigente, estável e transparente [55].

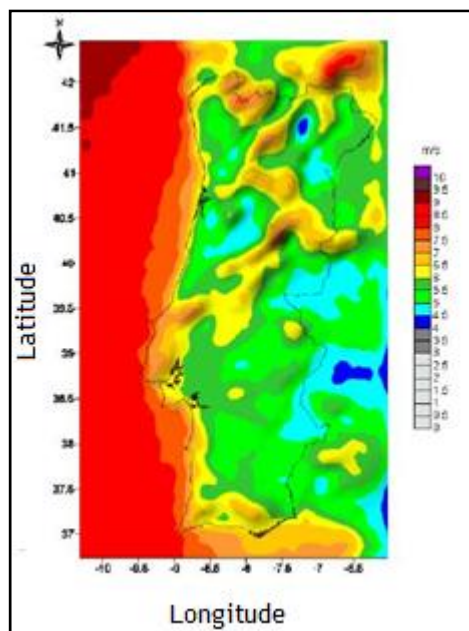


Figura 4.4 - Velocidade do vento em Portugal medido a 60m do solo [51].

**Velocidade do Vento:** a velocidade do vento é um elemento de extrema importância para a quantificação da energia mecânica que um aerogerador pode transformar em energia eléctrica, sendo importante realçar que a quantidade de energia contida no vento varia com o cubo da sua velocidade. É necessário a escolha do local e caracterizar o recurso eólico existente, pelo que se torna imprescindível instalar equipamentos de recolha de dados do vento durante um período mínimo de um ano.

O vento é definido essencialmente por dois parâmetros: velocidade e direcção. A sua intensidade não é regular e a sua disponibilidade depende do local [33].

Reduções pequenas da velocidade do vento originam grandes reduções da potência gerada [56].

Um dos principais problemas nos edifícios é a existência de turbulência, ou seja, a existência de fluxos de ar irregulares, remoinhos e vórtices. A turbulência reduz a possibilidade de utilizar o vento de forma efectiva num aerogerador, aumentando assim o desgaste e as possibilidades de rupturas (fadiga estrutural) [51].

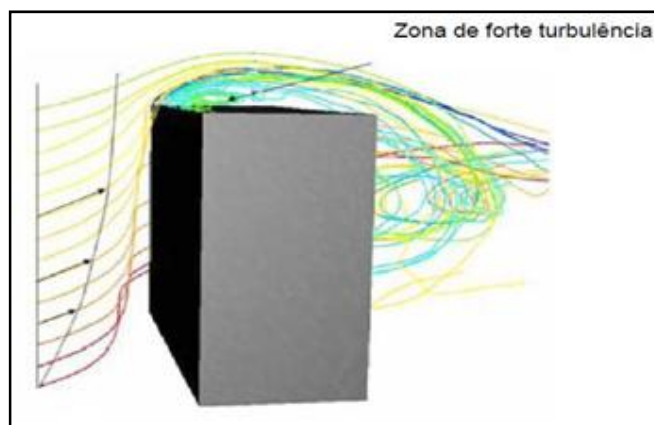
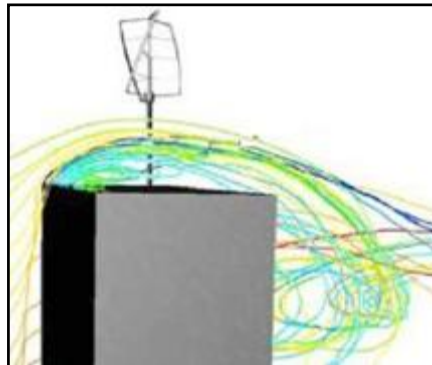


Figura 4.5 - Representação da turbulência num edifício [51].

Como se pode verificar no topo do edifício existe uma forte turbulência, por isso, é preciso ter em atenção que é necessário “contornar” este problema através da instalação de torres de suporte com altura suficiente para que a turbulência não seja sentida pelo aerogerador.



**Figura 4.6** - Exemplo da instalação de um aerogerador (exemplo: eixo vertical) num edifício [51].

A energia eólica mostra-se como uma das fontes renováveis com maior potencialidade e maior desenvolvimento futuro, não apenas pelas metas estabelecidas, mas também pelo interesse que desperta nas entidades e empresas o desenvolvimento de projectos de grande envergadura e visibilidade, além do retorno financeiro bastante atractivo [51].

### 4.3. Tecnologia Eólica

As turbinas eólicas, também conhecidas por aerogeradores, têm por função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica e, consequentemente, em energia eléctrica [33].

A potência que o vento transfere à turbina pode ser calculada pela seguinte expressão [57]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

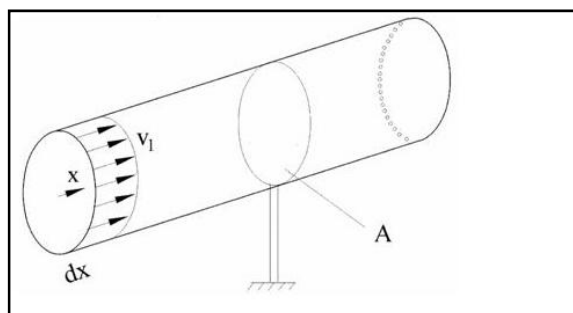
- P é a potência do vento (W);
- A representa a área de varrimento das pás da turbina (secção transversal), durante o seu movimento de rotação (m<sup>2</sup>);
- V<sup>3</sup> representa velocidade instantânea do vento no ponto de altura do aerogerador (m/s);
- ρ é a densidade do ar do local em causa (Kg/m<sup>3</sup>) [57].

A equação 4.1 demonstra que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento, uma vez que quando esta duplica a potência aumenta oito vezes [58].

As turbinas eólicas utilizam a energia de “travagem” do vento, logo se houver o dobro da velocidade obtêm-se por segundo o dobro das “fatias de vento” que atravessam as pás do rotor [58].

A figura 4.8 seguinte mostra que a uma velocidade de 8 m/s obtêm-se uma potência de 314 W/m<sup>2</sup> exposta ao vento. Considerou-se que o vento provém de uma direcção

perpendicular à área varrida pelas pás. Aos 16 m/s temos oito vezes mais potência, ou seja, 2509 W / m<sup>2</sup>.



**Figura 4.7** - Fluxo de ar através de uma área transversal A [59].

A tabela 4.2 mostra a potência por metro quadrado para diferentes velocidades do vento [60].

**Tabela 4.2** - Potência por metro quadrado para diferentes velocidades do vento.

m/s	W/m <sup>2</sup>
0	0
1	0,6
2	4,9
3	16,5
4	39,2
5	76,2
6	132,3
7	210,1
8	313,6
9	446,5
10	612,5
11	815,2
12	1058,4
13	1345,7
14	1680,7
15	2067,2
16	2508,8
17	3009,2
18	3572,1
19	4201,1
20	4900
21	5672,4
22	6521,9
23	7452,3

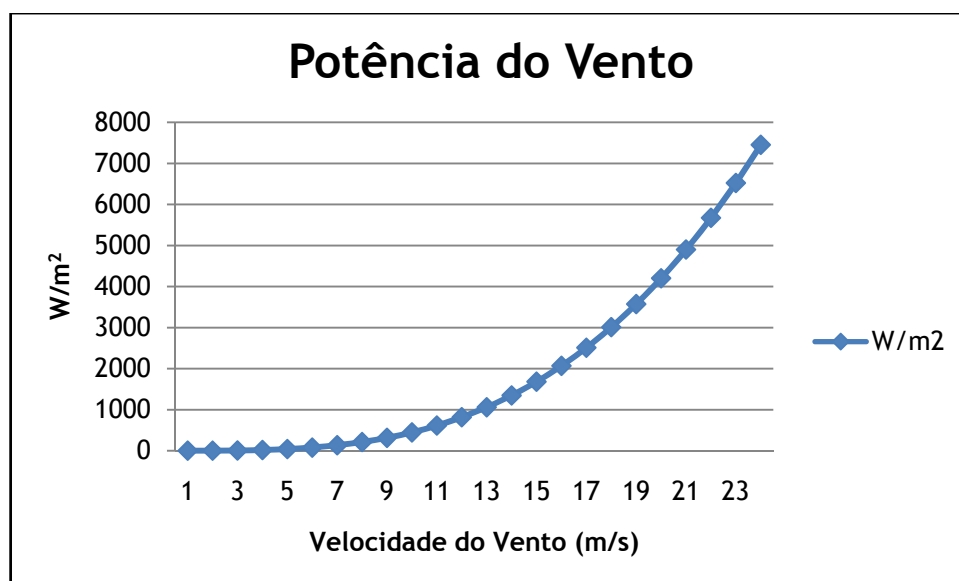


Figura 4.8 - Potência versus Velocidade do Vento [58].

Uma turbina eólica não permite transformar a totalidade da energia do vento em energia útil, por isso, é necessário introduzir na equação 4.1 o coeficiente de forma da turbina:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- $C_p$  é o coeficiente de forma da turbina (Coeficiente de Betz) que traduz a quantidade de energia mecânica disponível.

Para cada rotor, o coeficiente de potência,  $C_p$ , é determinado pelo desenho das pás.

As turbinas eólicas são projectadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade de vento. Esta potência é denominada potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada velocidade nominal do vento [61].

De seguida, são apresentadas algumas definições importantes no estudo de microgeração eólica:

**Área de varrimento da turbina:** determina a maior ou menor capacidade de receber energia do vento. Quanto maior a área de varrimento de uma turbina, maior será a sua capacidade de capturar energia do vento [61].

**Densidade do ar no local de instalação do aerogerador:** a energia cinética de um corpo em movimento é proporcional à sua massa. Da mesma forma, a energia cinética do vento depende da densidade do ar, ou seja, da sua massa por unidade de volume. Pode-se, então, concluir que quanto maior a densidade do ar, maior será a energia cinética fornecida à turbina. A densidade média à pressão atmosférica média e a 15°C é cerca de 1,225 kg/m³ [61].

**Rugosidade do terreno:** refere-se à influência exercida pelos obstáculos à passagem do vento. A superfície do solo, em altitudes elevadas (da ordem da grandeza do quilómetro) exerce uma pequena influência sobre o vento. No entanto, nas camadas mais baixas da atmosfera, a velocidade do vento é afectada pela fricção com a superfície terrestre. Quanto maior a rugosidade do terreno, maior será a perda da energia do vento, ou seja, em grandes

aglomerados habitacionais e zonas densamente arborizadas há um maior entrave à passagem do vento. Pelo contrário, em zonas mais abertas, como áreas agrícolas, vales, planícies, a influência sobre a passagem do vento é menor [62].

No Atlas Europeu de Vento, os diferentes terrenos foram divididos em quatro tipos, cada um caracterizado pelos seus elementos de rugosidade [62]:

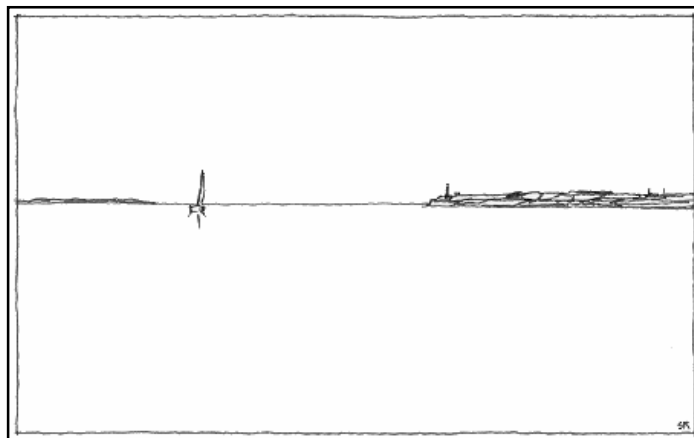


Figura 4.9 - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 0.

Esta categoria inclui o mar, rios e lagos.

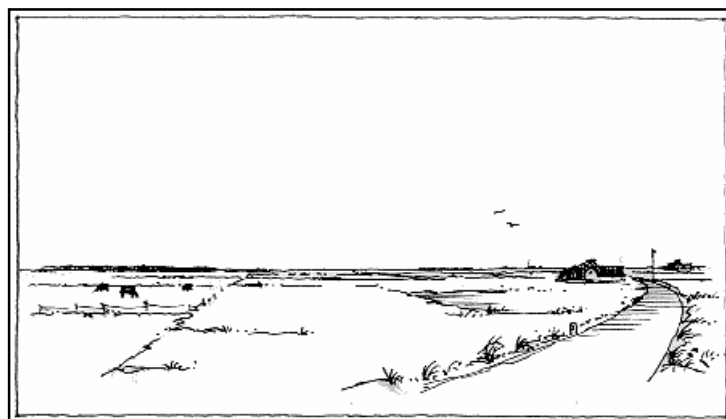
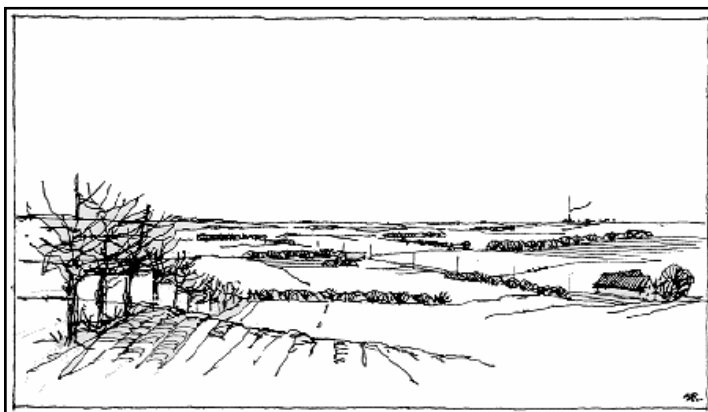


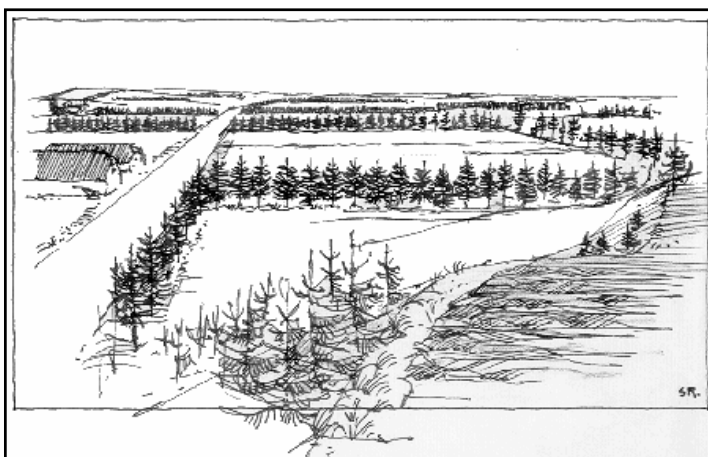
Figura 4.10 - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 1: áreas abertas, com poucos ventos.

O terreno deve ser bastante aberto, plano ou com ondulação suave.



**Figura 4.11** - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 2: terrenos agrícolas com quebras de vento.

O terreno é caracterizado por grandes áreas abertas, com a presença ou não de ondulação.



**Figura 4.12** - Exemplo de um terreno correspondente a rugosidade classe 3: zonas urbanas, florestas e terrenos agrícolas com muitos ventos.

A tabela, representada de seguida, apresenta o coeficiente característico ( $\alpha$ ) dos locais mediante a classe dos mesmos:

**Tabela 4.3** - Coeficiente característico mediante o local de instalação [62].

Características do terreno	Classe	Coeficiente Característico do local
Zonas de neve	0	0.0002
Zonas áridas		
Áreas de água (mar, lagos)		
Quinta com pouca vegetação/estruturas	1	0.03
Vegetação muito reduzida		
Quinta com florestação média	2	0.1
Quinta com florestação média mas pouco densa		
Cidade	3	0.4
Floresta		
Subúrbios		
Zonas com elevada florestação		

#### 4.3.1. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é normalmente usada para realizar uma avaliação do potencial eólico por caracterizar estatisticamente de forma eficiente a distribuição da ocorrência de classes de velocidades para uma região em estudo, sendo caracterizada por dois parâmetros:

- factor de escala da distribuição (parâmetro A, m/s);
- factor adimensional de forma da distribuição (parâmetro k) [63].

#### 4.4. Tipos de Instalações

Este tipo de sistemas, podem funcionar em sistema isolado ou interligado com a rede. No caso de funcionarem em sistema isolado é necessário a existência de um sistema de armazenamento de energia, para posterior abastecimento em alturas de escassez da fonte de energia primária [64].



## 4.5. Constituintes de um Sistema Eólico

Um sistema de micro geração eólico é constituído por vários elementos. De seguida é apresentada uma breve descrição de cada um desses elementos.

### 4.5.1. Turbinas

É o componente de um sistema eólico responsável por captar a energia cinética do vento. A configuração da turbina influenciará directamente o rendimento global do sistema. As turbinas eólicas podem ser classificadas segundo a orientação do seu eixo.

#### 4.5.1.1. Eixo Horizontal

As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns. Grande parte da experiência mundial está voltada para a sua aplicação. São movidas por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (“lift”) forças que actuam segundo uma direcção perpendicular ao escoamento e por forças de arrasto (“drag”) forças que actuam segundo a direcção do escoamento [65].

As turbinas que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem adquirir mais potência do que aquelas que giram sob o efeito de forças de arrasto, para a mesma velocidade de vento.

As turbinas de eixo horizontal (convencionais) são predominantemente movidas por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que a área varrida pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Podem ser constituídos por uma ou mais pás. As pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais, sendo que os mais comuns são a madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada [59].



Figura 4.13 - Exemplos de turbinas de eixo horizontal [66].

#### 4.5.1.2. Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical apresentam como principal vantagem relativamente às de eixo horizontal o facto de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para as variações de direcção do vento, o que reduz a complexidade do projecto e os esforços resultantes na estrutura devido às forças de “Coriolis”.

Estas turbinas também podem ser movidas por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torres de vórtices. As turbinas do tipo Darrieus são movidas por forças de sustentação e são constituídas por lâminas curvas (duas ou três) fixas nas extremidades do eixo vertical [59].

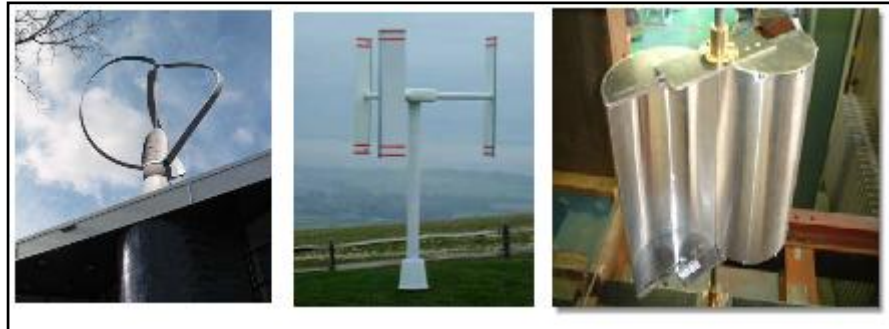


Figura 4.14 - Exemplos de turbinas de eixo vertical (Darrieus, H e Savonius) [66].

#### 4.5.1.3. Vantagens e Desvantagens das Turbinas de Eixo Horizontal e Eixo Vertical

De seguida são apresentadas algumas vantagens e desvantagens das turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical.

Tabela 4.4 - Vantagens e desvantagens das turbinas (eixo horizontal e vertical).

Eixo Horizontal	Eixo Vertical
Vantagens	Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capacidade de ajustar o ângulo de ataque das pás da turbina, fornecendo um controlo de potência mais rigoroso [67].</li> <li>-Normalmente são colocadas em locais mais altos que as turbinas de eixo vertical, logo permite-lhes captar ventos de maior velocidade o que significa um aumento de produção de energia [59].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não necessitam de mecanismos de acompanhamento das variações da direcção do vento.</li> <li>-A maquinaria inerente à turbina é colocada no solo (menores custos de manutenção),</li> <li>-São esteticamente mais atractivas [65].</li> </ul>
Desvantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>-As instalações são mais complexas porque toda a maquinaria se situa no topo da torre de instalação (aumento substancial do custo de transporte, instalação e manutenção) [59].</li> <li>-Impacto visual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-O seu fabrico implica uma maior quantidade de material relativamente às turbinas de eixo horizontal [59].</li> <li>-Podem ser instaladas mais próximas do solo, onde geralmente os ventos são mais fracos.</li> <li>-Impacto visual.</li> </ul>

### 4.5.2. Gerador

A transformação de energia mecânica de rotação em energia eléctrica através de equipamentos de conversão electromecânica é um problema tecnologicamente dominado.

Não obstante ser já um assunto com elevado conhecimento técnico verifica-se que a integração de geradores nos sistemas de conversão eólica constitui um grande problema, que envolve principalmente:

- Variação da velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- Variações do binário de entrada, uma vez que as variações da velocidade do vento conduzem a variações de potência transmitidas ao eixo de rotação;
- Exigência de frequência e tensão constantes na energia produzida.

Existem várias alternativas de geradores, sendo que os mais comuns são:

- Geradores síncronos
- Geradores assíncronos
- Geradores de comutador de corrente alternada [59].

### 4.5.3. Baterias

À semelhança do que já foi dito em relação à escolha de baterias para um sistema fotovoltaico, o tipo de baterias e os parâmetros associados à sua escolha são iguais aos referidos no Capítulo 3.

As características intermitentes de funcionamento dos sistemas micro eólicos conduzem à existência de componentes de armazenamento de energia eléctrica. Os equipamentos utilizados para realizar esta função são as baterias, as quais armazenam a energia eléctrica sob a forma de energia química. As baterias aumentam a fiabilidade do sistema, pois permitem o fornecimento contínuo de electricidade em ocasiões de vento reduzido ou ausência de vento. É importante referir que se o sistema contemplar baterias torna-se necessário acoplar um inversor.

Geralmente as baterias mais utilizadas são:

- Ácido de chumbo;
- Alcalinas.

#### **Escolha de Baterias**

A escolha das baterias para um sistema eólico deve ser criteriosa e ter em atenção certas características, tais como:

- Dias de autonomia;
- Capacidade de armazenamento;
- Taxa de descarga;
- Tempo de vida;
- Gama de Temperatura;
- Manutenção necessária;
- Preço.

A escolha das baterias a utilizar no sistema eólico deve ter em atenção o sistema a que se destina e segundo as características apresentadas [29].

## Capítulo 5

# Sistema Fotovoltaico

Neste capítulo, são apresentados os cálculos efectuados para a obtenção da energia produzida por um sistema fotovoltaico.

Foi realizado o estudo para a cidade do Porto com latitude ( $\varnothing$ ) igual a  $41,13^\circ$  segundo dados do RetScreen [68].

Como o cálculo é feito numa base diária e varia mensalmente, foram considerados os dias médios de cada mês ( $d_n$ ), pois torna mínimo o erro do valor que representa a radiação extraterrestre média mensal conforme apresentado na tabela 5.1 [69].

Tabela 5.1 - Dias médios de cada mês.

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Dia	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
0-365	17	47	76	106	136	163	199	229	259	289	319	345

### 5.1. Metodologia de Cálculo da Energia Produzida pelo Sistema Fotovoltaico

As equações apresentadas nesta metodologia são referentes a [70].

Depois de saber qual o dia médio de cada mês tornou-se necessário calcular a declinação ( $\delta$ ), que corresponde ao ângulo entre o plano do equador e a direcção Sol - Terra.

A equação 5.1 permite calcular a declinação:

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(2\pi \frac{284+d_n}{365}\right) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

De seguida calculou-se o ângulo horário de nascer ( $w_s$ ) e pôr-do-sol ( $w_p$ ) para a superfície horizontal, tendo em conta a declinação e a latitude do local, segundo a equação 5.2:

$$w_s = -\arccos(-\operatorname{tg}(\delta) \times \operatorname{tg}(\varnothing)) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Sabendo que  $w_s = -w_p$

Depois de obtidos estes ângulos, converteram-se para horas, para se poder ter uma noção mais realista do que representam através da equação 5.3:

$$H_{solar} = 12 + \frac{w_s}{15} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Pode então verificar-se a duração do dia solar, calculando a diferença entre a hora de nascer e pôr-do-sol.

O ângulo solar para uma determinada hora pode ser obtido através da equação 5.3 resolvendo-a em ordem a  $w_s$ .

Importa a esta altura apresentar algumas definições:

- Distância Zenital ( $\theta_z$ ) é o ângulo entre o zénite e a radiação directa no plano;
- Elevação Solar ( $\gamma_s$ ) é o ângulo formado entre o plano horizontal e a radiação directa no plano e pode ser calculado através de  $90^\circ - \theta_z$ ;
- Azimute solar ( $\psi_s$ ) é o ângulo formado entre a direcção Sul e a projecção da linha Sol - Terra sobre a horizontal. O Azimute para Oeste é positivo e para Este é negativo.

Calculou-se então a posição do Sol relativamente a um plano horizontal. Para isso foi efectuado o cálculo da distância Zenital, elevação solar e do azimute, considerando intervalos de 15 minutos, desde a hora de nascer até à hora de pôr-do-sol.

A Distância Zenital é calculada através da equação 5.4:

$$\theta_z = \arccos(\sin(\delta) \times \sin(\varnothing) + \cos(\delta) \times \cos(\varnothing) \times \cos(w)) \quad (\text{Eq. 5.4})$$

em que  $w$  é o ângulo solar para uma determinada hora

Logo a Elevação solar é igual à equação 5.5:

$$\gamma_s = \theta_z - 90^\circ = (-\arccos(\sin(\delta) \times \sin(\varnothing) + \cos(\delta) \times \cos(\varnothing) \times \cos(w))) + 90^\circ \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Por sua vez o Azimute solar é calculado através da equação 5.6:

$$\psi_s = \arccos\left(\frac{\sin(\gamma_s) \times \sin(\varnothing) - \sin(\delta)}{\cos(\gamma_s) \times \cos(\varnothing)}\right), \text{ para } w < 0 \quad \psi_s = -\psi_s \quad (\text{Eq. 5.6})$$

### 5.1.1. Cálculo da Radiação Extraterrestre, Global, Difusa, Directa e do Albedo no Plano Horizontal e no Plano da Superfície a Instalar

“Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação electromagnética” [35].

No entanto, apenas uma parte da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre. As componentes mais importantes para o cálculo da produção de um sistema fotovoltaico são a radiação directa, difusa e do albedo (reflectida) [34].

#### 5.1.1.1. Radiação Diária Extraterrestre ( $H_0$ )

A radiação extraterrestre ( $W/m^2$ ) é a radiação obtida no topo da atmosfera, isto é, incidente numa superfície horizontal fora da presença da atmosfera. O seu valor diário é calculado em  $MJ/m^2$  [71].

O seu cálculo é efectuado através da equação 5.7:

$$H_0 = \frac{24}{2\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times \theta_s \quad (\text{Eq. 5.7})$$

em que:

- $\alpha$  é o azimute do plano que corresponde ao ângulo entre a “linha da gota de água” e o Sul;

- $\theta_s$  é o ângulo de incidência solar. Quando é considerando um plano inclinado, se o seu valor for superior a  $90^\circ$  significa que durante o período em que for maior que  $90^\circ$  não existe radiação directa na superfície de instalação (varia com a inclinação da superfície e com os meses do ano), sendo por isso necessário fazer um ajuste à radiação total no plano;

- $I_{sc}$  é uma constante solar de valor igual a  $1353 \text{ (W/m}^2\text{)}$  [72].

O cálculo do ângulo de incidência solar, é feito através da equação 5.8:

$$\theta_s = \arccos(\sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\alpha) \times \sin(w) \times \sin(\beta)) \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Simplificando,  $\alpha=0$ , por ser na atmosfera o azimute não é relevante:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|)) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

#### 5.1.1.2. Plano Horizontal

##### 5.1.1.2.1. Radiação Diária Global (H) no Plano Horizontal

Os valores da radiação diária global no plano horizontal ( $kWh/m^2$ ) foram fornecidos pelo RetScreen, para a cidade do Porto, podendo ser obtidos gratuitamente para qualquer ponto do Mundo.

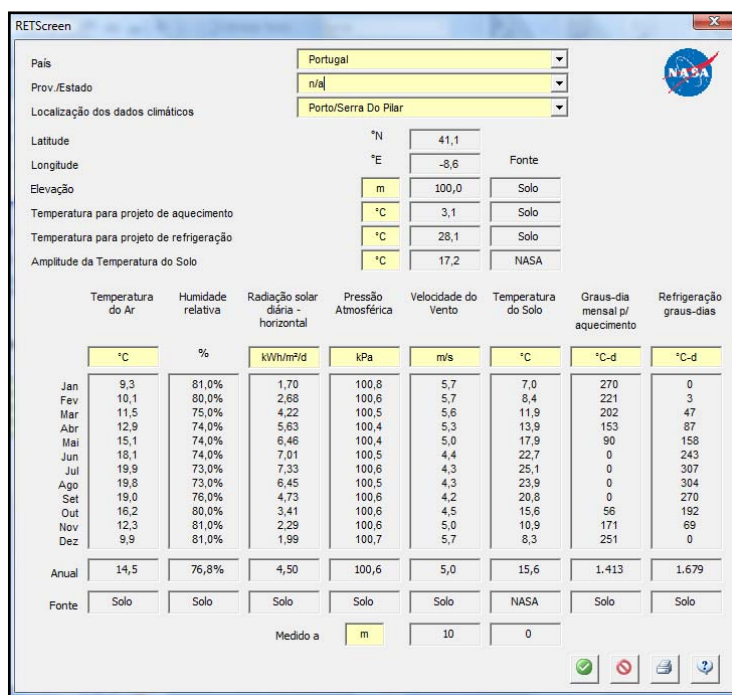


Figura 5.1 - Radiação média diária mensal obtida através do RetScreen.

#### 5.1.1.2.2. Radiação Diária Difusa ( $H_d$ ) no Plano Horizontal

Para se obter a radiação diária difusa no plano horizontal ( $\text{Wh/m}^2$ ) é necessário conhecer o índice de atenuação ( $K_T$ ), que representa o efeito de atenuação da atmosfera terrestre e é calculado através do quociente entre a radiação total diária e a radiação extraterrestre para o plano horizontal, como representado na equação 5.10 [73].

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Seguidamente calcula-se a radiação diária difusa ( $H_d$ ) expressa em  $\text{Wh/m}^2$  obtida através da equação 5.11:

$$H_d = H \times (1,188 - 2,272 \times K_T + 9,473 \times K_T^2 - 21,856 \times K_T^3 + 14,648 \times K_T^4) \quad (\text{Eq. 5.11})$$

#### 5.1.1.2.3. Radiação Diária Directa ( $H_b$ ) no Plano Horizontal

A Radiação diária directa expressa em  $\text{Wh/m}^2$  foi obtida através da diferença da radiação global  $H$  e da radiação difusa  $H_d$  como representado na equação 5.12:

$$H_b = H - H_d \quad (\text{Eq. 5.13})$$

#### 5.1.1.2.4. Radiação do Albedo ( $H_{\text{Albedo}}$ ) no Plano Horizontal

É a radiação proveniente do solo com origem na reflexão da radiação incidente na superfície. Depende das características do solo, através do factor  $\rho$  que representa a reflectividade do solo, sendo diferente para cada tipo de solo, como é demonstrado na tabela 5.2.

**Tabela 5.2** - Valores de  $\rho$  para cada tipo de solo.

Tipo de Solo	$\rho$
Solo Seco Escuro	0,2
Solo Húmido Verde	0,3
Areia Clara	0,4
Neve	0,6

O cálculo da radiação do albedo ( $\text{Wh/m}^2$ ) é efectuado através da equação 5.14:

$$H_{\text{albedo}} = H \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \times \rho \quad (\text{Eq. 5.14})$$

onde  $\beta$  representa a inclinação da superfície de instalação.

#### 5.1.1.3. Plano da Superfície de Instalação

Todas estas componentes, excepto a radiação do Albedo, porque no seu cálculo já é introduzida a inclinação da superfície, foram calculadas considerando a incidência num plano horizontal, por isso torna-se necessário calcular estas mesmas radiações para o plano da superfície de instalação com inclinação  $\beta$ .

Para isso é necessário calcular alguns parâmetros como é o caso do factor geométrico  $R_b$ .

O Factor Geométrico  $R_b$  é a razão entre a radiação solar directa sobre uma superfície inclinada e a radiação solar directa sobre um plano horizontal.

Para o hemisfério Sul a equação que se aplica é a equação 5.15:

$$R_b = \frac{(\cos(\theta - \beta) \times \cos(\delta) \times \sin(|w_{ss}|) + |w_{ss}| \times \sin(\theta - \beta) \times \sin(\delta))}{(\cos(\theta) \times \cos(\delta) \times \sin(|w_{ss}|) + |w_{ss}| \times \sin(\theta) \times \sin(\delta))} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

sabendo que  $w_{ss}$  representa a hora de saída do Sol sobre o plano e pode ser calculado através da equação 5.16:

$$w_{ss} = \max(w_s; -\arccos(-\tan(\delta) \times \tan(\theta - \beta))) \quad (\text{Eq. 5.16})$$

Para outras situações em que o plano não se encontre virado para o hemisfério sul, é necessário calcular, através do integral entre a radiação  $H_0$  para o plano inclinado e  $H_0$  para o horizontal entre as horas solares ( $W's$  e  $W'p$ ), com a condição de que o ângulo de incidência



solar ( $\theta_s$ ) seja maior ou igual a  $90^\circ$  para garantir que só se contabiliza a radiação directa efectivamente incidente no painel e não toda a radiação directa existente no dia.

Resulta então a equação 5.17 e 5.18:

$$R_b = \int_{w'_s}^{w'_p} \frac{H_{0\_inclinado}}{H_{0\_horizontal}} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

$$R_b = \int_{w'_s}^{w'_p} \frac{\frac{24}{\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times \theta_s}{\frac{24}{\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} \partial w$$

(Eq. 5.18)<sup>1</sup>

Simplificando obtém-se a equação 5.19:

$$R_b = \frac{\sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (w'_p - w'_s)}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} + \frac{-\sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times (w'_p - w'_s)}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} + \frac{\cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} + \frac{\cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} + \frac{-\cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\alpha) \times (\cos(w'_p) - \cos(w'_s))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

Como existem várias situações em que a hora de nascer e pôr-do-sol não coincidem com a hora inicial e final de incidência de radiação na superfície de instalação e o integral de  $R_b$  depende destas horas solares como já foi demonstrado, foi necessário calcular a radiação horária directa ( $h_b$ ) e difusa ( $h_d$ ) no plano horizontal e depois converter para o plano da superfície de instalação, para este ajuste poder ser efectuado.

#### 5.1.1.3.1. Radiação Horária Global (h) no Plano Horizontal

Para o cálculo da radiação horária global ( $\text{Wh/m}^2$ ) no plano horizontal é necessário calcular o valor de  $r_t$ , coeficiente que permite converter a radiação diária global para radiação horária global no plano horizontal.

Pode ser calculado através da equação 5.20:

$$r_t = \frac{\pi}{24} \times (a + b \times \cos(w)) \times \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - w_s \times \cos(w_s)} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

<sup>1</sup> O integral encontra-se resolvido no Anexo 1

Com:

$$a = 0,409 + 0,5016 \times \sin(w_s - \frac{\pi}{3}) \quad (\text{Eq. 5.21})$$

E

$$b = 0,6609 - 0,4767 \times \sin(w_s - \frac{\pi}{3}) \quad (\text{Eq. 5.21})$$

Logo a radiação horária global é calculada através da equação 5.22:

$$h = r_t \times H \quad (\text{Eq. 5.22})$$

#### 5.1.1.3.2. Radiação Horária Difusa ( $h_d$ ) no Plano Horizontal

Para o cálculo da radiação horária difusa ( $\text{Wh/m}^2$ ) no plano horizontal é necessário calcular o valor de  $r_d$ , coeficiente que permite converter a radiação diária difusa para radiação horária difusa no plano horizontal.

Pode ser calculado através da equação 5.23:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \times \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - w_s \times \cos(w_s)} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

Finalmente a radiação horária difusa é calculada através da expressão 5.24:

$$h_d = r_d \times H_d \quad (\text{Eq. 5.24})$$

#### 5.1.1.3.3. Radiação Horária Directa ( $h_b$ ) no Plano Horizontal

A radiação horária directa ( $\text{Wh/m}^2$ ) resulta da diferença entre a radiação horária global e a radiação horária difusa, conforme apresentado na equação 5.25:

$$h_b = h - h_d \quad (\text{Eq. 5.25})$$

#### 5.1.1.3.4. Radiação Horária Difusa ( $h'_d$ ) no Plano da Superfície de Instalação

O cálculo da radiação horária difusa ( $\text{Wh/m}^2$ ) no plano da superfície a instalar é feito através da equação 5.26:

$$h'_d = h_d \times \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{Eq. 5.26})$$

### 5.1.1.3.5. Radiação Horária Directa ( $h'_b$ ) no Plano da Superfície de Instalação

A radiação horária directa ( $\text{Wh/m}^2$ ) é calculada através da equação 5.27:

$$h'_b = h_b \times R_b \quad (\text{Eq. 5.27})$$

### 5.1.1.3.6. Radiação Horária do Albedo ( $h'_{\text{Albedo}}$ ) no Plano da Superfície de Instalação

O cálculo da radiação do albedo ( $\text{Wh/m}^2$ ) no plano da superfície de instalação é efectuado através da equação 5.28:

$$h'_{\text{albedo}} = h \times \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \times \rho \quad (\text{Eq. 5.28})$$

### 5.1.1.3.7. Radiação Total Horária ( $h_t$ ) no Plano da Superfície de Instalação

Depois de obtidas as radiações horárias, calculou-se a radiação total horária ( $\text{Wh/m}^2$ ) para o plano do painel/superfície através da equação 5.29:

$$h_t = h'_b + h'_d + h'_{\text{albedo}} \quad (\text{Eq. 5.29})$$

## 5.2. Energia Produzida pelo Sistema Fotovoltaico

Depois de obtida a radiação total horária, foi efectuado o seu somatório, para obter a radiação total, e consequentemente dividida por quatro porque como os intervalos horários considerados foram de 15 minutos, é necessário corrigir o “erro” introduzido por estes intervalos para obter a radiação total horária.

Obtida a radiação total diária foi necessário ter em atenção que o cálculo só foi efectuado para um dia de cada mês, tornando-se necessário multiplicar pelo número de dias de cada mês para obter a radiação total mensal e posteriormente realizar o somatório de todos os meses.

Através da equação 5.30 obteve-se a produção anual do sistema fotovoltaico considerado:

$$E = \overline{H_t} \times \text{Área} \times \eta_{\text{tecnologia}} \times \eta_{\text{MPPT}} \quad (\text{Eq. 5.30})$$

- $\overline{H_t}$  é a radiação total anual incidente na superfície;

- $\eta_{\text{MPPT}}$  é igual a 95%;

- $\eta_{\text{tecnologia}}$ =13% (tecnologia de Silício Monocristalino adoptada).

Para se poder ter uma perspectiva mensal da produção este cálculo também foi efectuado para cada mês.

### 5.3. Custo Nivelado de Energia

Todos os cálculos efectuados foram feitos com base na área disponível, por isso deste modo o custo de instalação também foi calculado em função da área (€/m<sup>2</sup>).

Para o investimento considerou-se um valor que se situa entre os extremos da gama de variação actualmente aceite como representativa de sistemas fotovoltaicos, um valor baixo (optimista) de 4500 €/kWp e um valor alto de 6500 €/kWp, sendo o mais aconselhado 6000€/kWp, já considerando todos os preços de instalação e de componentes inerentes (regulador de carga, inversor, cablagem) [32].

Para uma potência instalada de 1kWp o valor em área coberta é de aproximadamente 8m<sup>2</sup>. [32] A partir destes valores obteve-se o custo por m<sup>2</sup> instalado, como apresentado de seguida pela equação 5.31:

$$C_{m^2} = \frac{C_{kWp}}{Área(kWp)} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

O valor obtido foi de 750 €/m<sup>2</sup>.

Como custo de Operação e Manutenção (O&M) foi considerado que durante o tempo de vida do sistema os seus custos de O&M corresponderiam a 2% do investimento total.

Tendo estes valores, é necessário calcular o Custo Nivelado de Energia através da seguinte equação 5.32 e 5.33:

$$CNE = \frac{\sum_e(\tau_e \times I)}{EAP} \quad (\text{Eq 5.32})$$

sendo:

$$\tau_e = \frac{i \times (1+i)^{ne}}{(1+i)^{ne} - 1} \quad (\text{Eq 5.33})$$

em que:

- CNE representa o custo nivelado de energia (€/kWh);
- I é o investimento total no ano 0 para a instalação já contabilizando a Operação e Manutenção (€);
- EAP a energia anual produzida (kWh/ano);
- $\tau_e$  o factor de anualização para o equipamento;
- i taxa de actualização (7%);
- $n_e$  o tempo de vida do equipamento.

Conforme dito no Capítulo 3 o tempo de vida médio é de cerca de 25 anos [32].

### 5.4. CO<sub>2</sub> Evitado

A opção de utilizar as tecnologias baseadas em energias renováveis, para além de contribuírem para a redução da factura mensal de electricidade, evita a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Tendo em consideração o factor de emissão de CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> este associado à produção de electricidade do SEN, 470g CO<sub>2</sub>/kWh pode-se calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado e a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado por € investido através da seguinte equação 5.34 e 5.35 [74].

$$CO_{2\text{produzido tecnologia convencional}} = 0,47 \times E_{\text{produzida pelo SFV}} \quad (\text{Eq. 5.34})$$

Para calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado por € investido usou-se a expressão 5.35:

$$CO_{2\text{evitado}}/\text{ano}/\text{€}_{\text{investido}} = \frac{CO_{\text{evitado}}}{\text{Total do investimento}} \quad (\text{Eq. 5.35})$$

## 5.5. Resultados por m<sup>2</sup>

Como o estudo foi realizado considerando variações do azimute de 15 em 15 graus, e de inclinação de 10° em 10°, de seguida apresentam-se os resultados obtidos, exemplificando apenas duas situações, respectivamente o melhor e o pior caso possível, sendo apresentados os resultados referentes a 1m<sup>2</sup>.

Como melhor caso foi considerada uma cobertura voltada a Sul ( $\alpha=0^\circ$ ), com inclinação de 35° [41].

Como pior caso considerou-se uma fachada ( $\beta=90^\circ$ ) voltada a Norte ( $\alpha=-180^\circ$ ) e albedo igual a 0,2 (solo seco e escuro).

### 5.5.1. “Melhor” Situação

A título de exemplo são apresentados os valores de radiação total nos dias médios de todos os meses e é feita uma breve comparação entre o melhor e o pior mês.

#### 5.5.1.1. Radiação Total nos Dias Médios

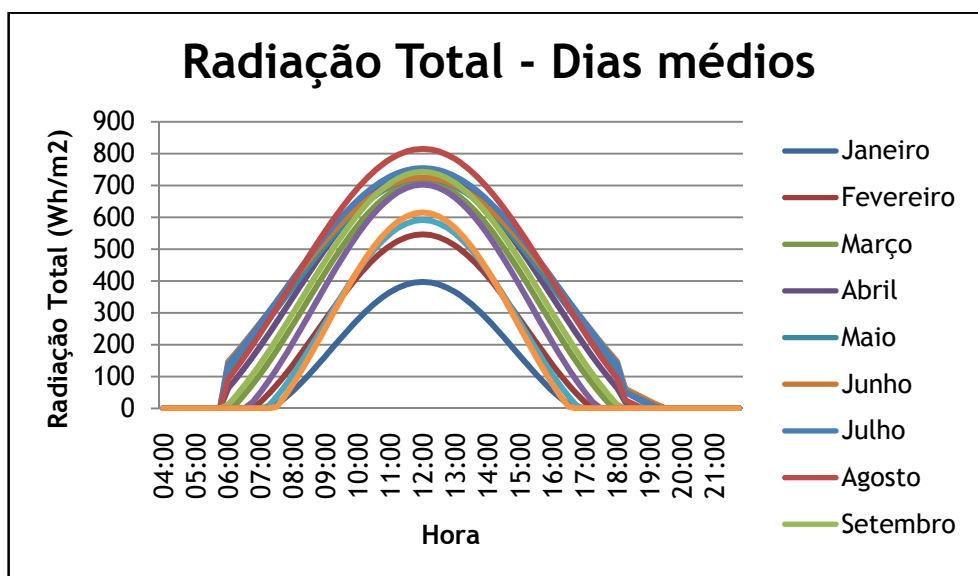


Figura 5.2 - Radiação total dos dias médios em intervalos de 15 minutos.

Como se pode verificar pela figura 5.2 a radiação total varia bastante em intensidade e em início e fim de incidência na superfície ao longo do ano.

#### 5.5.1.2. Radiação Total nos Dias Médios para o Pior e Melhor Mês

O gráfico seguinte serve para se verificar as diferenças entre a radiação entre estes dois meses, Janeiro e Agosto respectivamente.

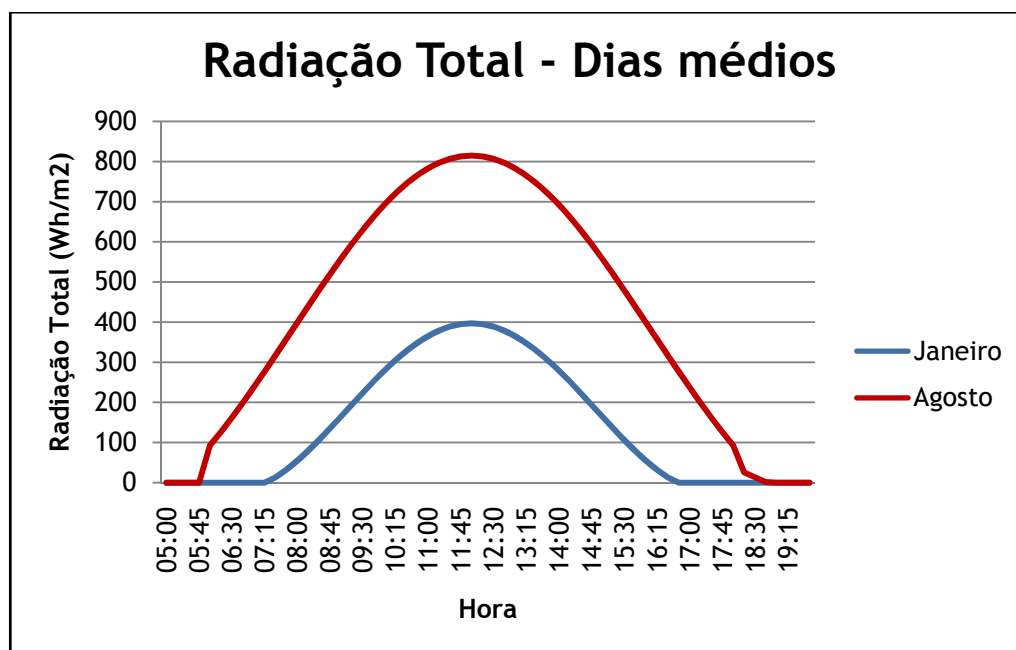


Figura 5.3 - Radiação total dos dias médios em intervalos de 15 minutos para Janeiro e Agosto.

#### 5.5.1.3. Produções Mensais

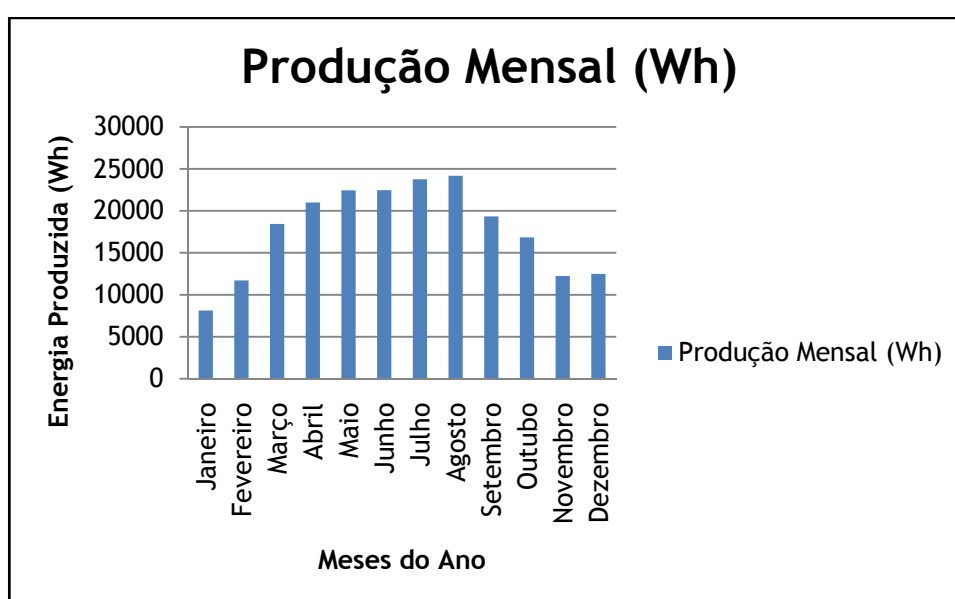


Figura 5.4 - Gráfico representativo da produção mensal em Wh.

Como seria de esperar existe uma diferença nos níveis de radiação total para cada mês, esta mesma diferença reflecte-se na energia produzida de todos os meses destacando-se a diferença entre Agosto e Janeiro sendo uma diferença de quase 15 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.5.1.4. Produção Anual

Tabela 5.3 - Somatório das produções mensais.

Produção Anual (kWh)
213,05

#### 5.5.1.5. Custo Nivelado de Energia

Tabela 5.4 - Custo nivelado de energia.

Custos		
<b>Custo por m<sup>2</sup></b>	Custo total por m <sup>2</sup>	750 €
750	Custo de O&M	15 €
<b>Taxa de Actualização</b>	Total do Investimento	765 €
7%	Custo Anualizado do Investimento	65,65 €
<b>n (anos)</b>	<b>Custo Nivelado de Energia (€/kWh)</b>	<b>0,31</b>
25		

#### 5.5.1.6. CO<sub>2</sub> Evitado

Tabela 5.5 - CO<sub>2</sub> evitado através da utilização de energias renováveis.

kg CO <sub>2</sub> Evitado
<b>Produção Eléctrica (kWh)</b>
213,05
<b>Factor de Emissão DL 63/2008 (kgCO<sub>2</sub>/kWh)</b>
0,47
<b>kg CO<sub>2</sub></b>
100,13
<b>kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup></b>
100,13
<b>kg CO<sub>2</sub> evitado/ano/€ investido</b>
0,13

### 5.5.2. “Pior” Situação

#### 5.5.2.1. Produções Mensais

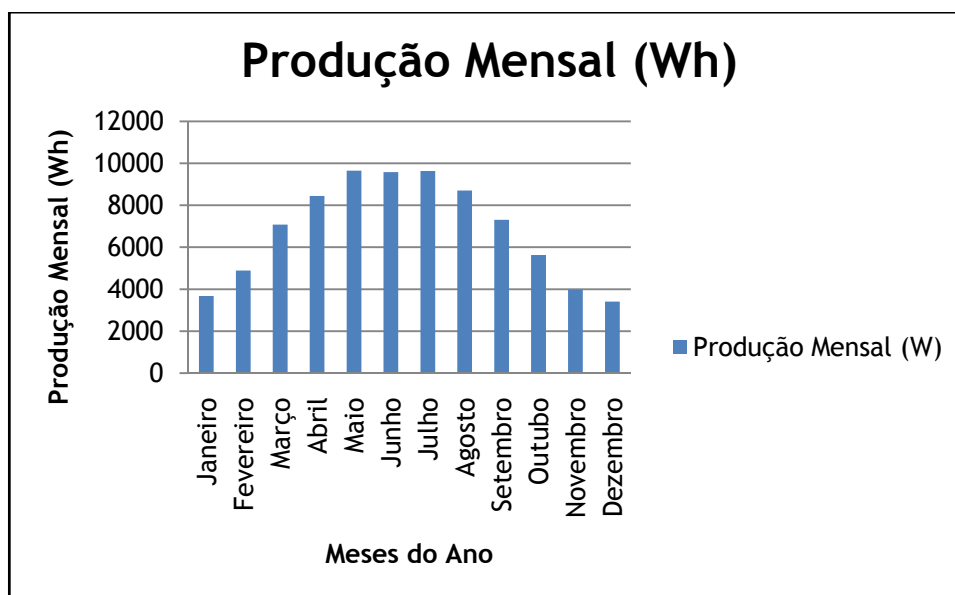


Figura 5.5 - Gráfico representativo da produção mensal em Wh.

#### 5.5.2.2. Produção Anual

Tabela 5.6 - Somatório das produções mensais.

Produção Anual (kWh)
82

#### 5.5.2.3. Custo Nivelado de Energia

Tabela 5.7 - Custo nivelado de energia.

Custos		
<b>Custo por m<sup>2</sup></b>	Custo total de m2	750 €
750	Custo de O&M	15 €
<b>Taxa de Actualização</b>	Total	765 €
7%	Custo Anualizado do Investimento (€)	65,65
<b>n (anos)</b>	<b>Custo Nivelado de Energia (€/kWh)</b>	
25	0,80	



5.5.2.4. CO<sub>2</sub> EvitadoTabela 5.8 - CO<sub>2</sub> evitado através da utilização de energias renováveis.

kg CO <sub>2</sub> Evitado
Produção eléctrica
81,98
Factor de Emissão DL 63/2008 (kgCO <sub>2</sub> /kWh)
0,47
kg CO <sub>2</sub>
38,53
kg CO <sub>2</sub> evitado/ano/€ investido
0,05

## 5.6. Conclusões

Como se pode verificar através dos resultados obtidos, a orientação de um sistema fotovoltaico é muito importante. A produção de um sistema virado a sul é 2,5 vezes maior que a produção de um sistema virado a norte, instalado numa fachada ( $\beta=90$ ). Pode-se verificar que a produção no melhor mês do pior caso é ligeiramente superior à produção obtida no melhor caso para o seu pior mês.

Isto deve-se ao facto de na fachada quase não existir radiação directa, somente em algumas horas em alguns meses do ano, e mesmo a radiação difusa ser reduzida. É importante referir que se não fosse a radiação do albedo a produção anual seria ainda mais reduzida, passando para cerca de 42 kWh/m<sup>2</sup>ano, o que denota a importância da radiação do Albedo.

Em relação ao custo nivelado de energia também se nota uma diferença bastante acentuada, passando de 31 centimos para 80 centimos que representa um aumento de mais de 100% de um custo de produção em relação ao outro.

## Capítulo 6

### Sistema Eólico

Neste capítulo, são apresentados os cálculos efectuados para a obtenção da produção de energia de um sistema eólico em ambiente urbano.

O cálculo foi feito numa base anual, conhecendo o valor médio anual de vento e as características do edifício onde será implementado o aerogerador. Este estudo foi realizado considerando aerogeradores de eixo horizontal, tendo respectivamente 2, 3 e 6 pás, e aerogeradores de eixo vertical.

#### 6.1. Metodologia de Cálculo da Energia Produzida pelo Sistema Eólico

Como o objectivo do estudo é ter uma ferramenta de âmbito geral, foi realizada uma reunião das características típicas (Área de Varrimento, Preço e Potência Nominal entre outras) de aerogeradores tipo, nomeadamente, dos aerogeradores em estudo.

### 6.1.1. Características dos Aerogeradores Consoante a sua Tipologia

As características obtidas encontram-se nas tabelas seguintes:

**Tabela 6.1** - Eixo horizontal, 2 pás [66].

Nº de Pás	Área de Varrimento	P nominal (kW)	Velocidade Nominal do Vento (m/s)	“Cut-In” (m/s)	“Cut-off” (m/s)	Preço (€)	Preço/kW (€/kW)
2	3,8	0,8	14	3	18	6.237	7.796
	4,52	0,9	10	2,3	60	3.679	4.088
	8,04	1,6	10	2,5	60	7.800	4.875
	28,27	2,1	8	2,5	60	7.900	3.762
	10,18	3	12	2,8	60	8.679	2.893
	28,27	5,5	10	3	60	17.614	3.203
	24,7	6	12	4	28	12.000	2.000
	12	8	20	2	32	30.500	3.813
	25	11	10	3	25	60.000	5.455
	78,6	25	12	3	30	40.000	1.600
	154	30	15	2	32	60.000	2.000
	Média		12,1	2,7	42,3	23.128	3.771

Tabela 6.2 - Aerogeradores de eixo horizontal, 3 pás [66].

Nº de Pás	Área de Varrimento	P nominal (kW)	Velocidade Nominal do Vento (m/s)	“Cut-In” (m/s)	“Cut-off” (m/s)	Preço (€)	Preço/kW (€/kW)
3	1,13	0,3	12,6	3	16	3.520	11.733
	1,8	0,3	10	3	18	2.200	7.333
	1,96	0,46	12,5	3	20	2.800	6.087
	5,11	0,6	10	2,5	18	1.253	2.088
	4,91	0,75	12	2,5	18	1.570	2.093
	2,41	1	12	2,9	15	2.392	2.392
	7,65	1,4	16	2,5	20	7.654	5.467
	19,6	2,5	10	3	18	11.466	4.586
	19,6	2,5	8,5	3	20	13.685	5.474
	22,9	5	11	3	60	1.500	300
	19,6	5	10,5	2,75	12	8.000	1.600
	19,6	5,6	17	2,5	22	22.250	3.973
	23,76	6	12	2,5	26	12.400	2.067
	39,6	10	11	2,5	32	42.930	4.293
	38,5	10	12	3	24	29.000	2.900
	63,62	15	12	2,5	26	30.000	2.000
	95	20	13	4	20	35.000	1.750
	50,3	20	12,5	3,5	37,5	50.000	2.500
	133	30	12	2,5	25	125.000	4.167
	Média		11,9	2,9	23,6	21.191	3.832

Tabela 6.3 - Aerogeradores de eixo horizontal, 6 pás [66].

Nº de Pás	Área de Varrimento	P nominal (kW)	Velocidade Nominal do Vento (m/s)	“Cut-In” (m/s)	“Cut-off” (m/s)	Preço (€)	Preço/kW (€/kW)
6	0,196	0,025	10	2,6	18	400	16.000
	0,655	0,09	10	2,6	18	699	7.767
	0,655	0,09	10	2,6	18	699	7.767
	0,68	0,1	20	3,5	20	2.780	27.800
	Média		12,5	2,8	18,5	1.145	14.833

Tabela 6.4 - Aerogeradores de eixo vertical [66].

Nº de Pás	Área de Varrimento	P nominal (kW)	Velocidade Nominal do Vento (m/s)	“Cut-In” (m/s)	“Cut-off” (m/s)	Preço (€)	Preço/kW (€/kW)
Eixo Vertical	1	0,5	17	2	26	1.450	2.900
	2,25	0,75	14	2	24	11.647	15.529
	4	1	18	2	26	25.883	25.883
	4,5	1,3	12	3	28	8.190	6.300
	5,12	2	12	2	26	11.980	5.990
	5,3	2,5	14	4	15	12.500	5.000
	10	2,9	10,5	4	20	17.110	5.900
	5,5	3	14	3,5	20	23.000	7.667
	7,26	3	14	2	20	26.000	8.667
	17	5	12	3	30	37.800	7.560
	12,3	6	14	2	28	36.000	6.000
	13,1	6	12,5	4,5	16	35.000	5.833
	12	8	20	2	26	38.000	4.750
	12	10,8	12	4	32	13.500	1.250
	15	19	12	3	28	25.650	1.350
	Média		13,9	2,9	24,3	21.581	7.372

### 6.1.2. Cálculo da Curva de Potência dos Aerogeradores

Através dos valores das tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, foi representada uma curva de potência de referência, normalizada entre 0 e 1 para cada tipo de aerogerador.

Utilizando as velocidades de vento de “cut-in”, “cut-off” e a velocidade nominal do vento e os parâmetros seguintes obteve-se a curva de potência para cada tipo de aerogerador em função da velocidade do vento.

Parâmetros:

$$a_1 = \frac{1}{2(\frac{1}{2}RWS - Cut_{in})} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$b_1 = 0 - a_1 \times Cut_{in} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

$$a_2 = \frac{1}{2(RWS - \frac{1}{2}RWS)} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

$$b_1 = \frac{1}{2} - a_2 \times \frac{1}{2}RWS \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Em que RWS é a velocidade nominal de vento para cada aerogerador, ou seja é a velocidade à qual a potência nominal do aerogerador é atingida.

As curvas de potência normalizadas entre 0 e 1 variam consoante a velocidade, por isso, considerou-se um intervalo entre 0 e 28 m/s, sendo 28 o valor máximo, visto que é um valor altamente improvável de obter em ambiente urbano. As curvas obtidas para cada tipo de aerogerador encontram-se representadas de seguida.

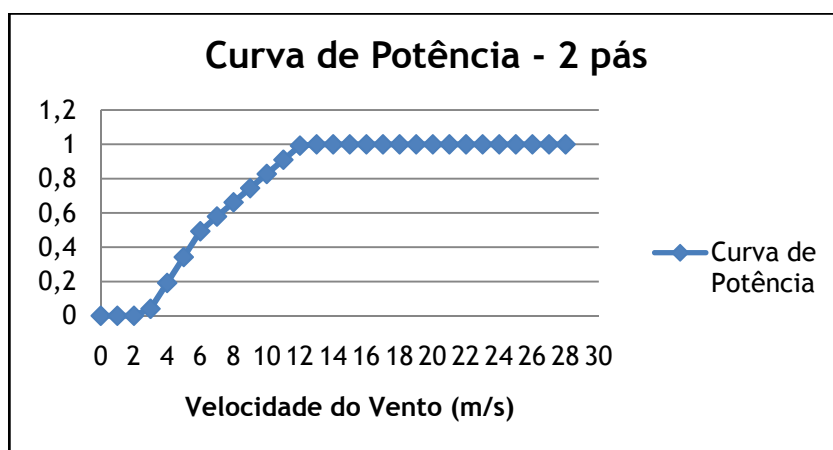


Figura 6.1 - Curva de potência para aerogeradores de 2 pás.

Neste tipo de aerogerador, não existe corte porque a velocidade de “cut-off” deste tipo de aerogeradores é superior ao valor máximo do intervalo de velocidade considerada, como se pode ver na tabela 6.1.

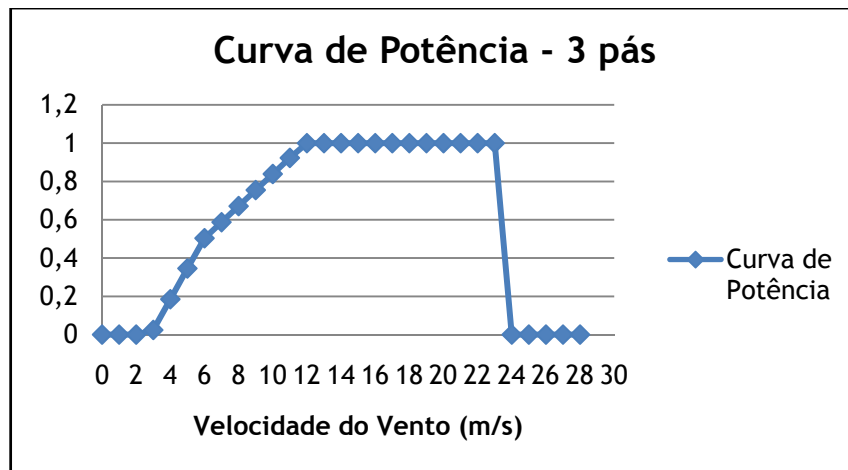


Figura 6.2 - Curva de potência para aerogeradores de 3 pás.

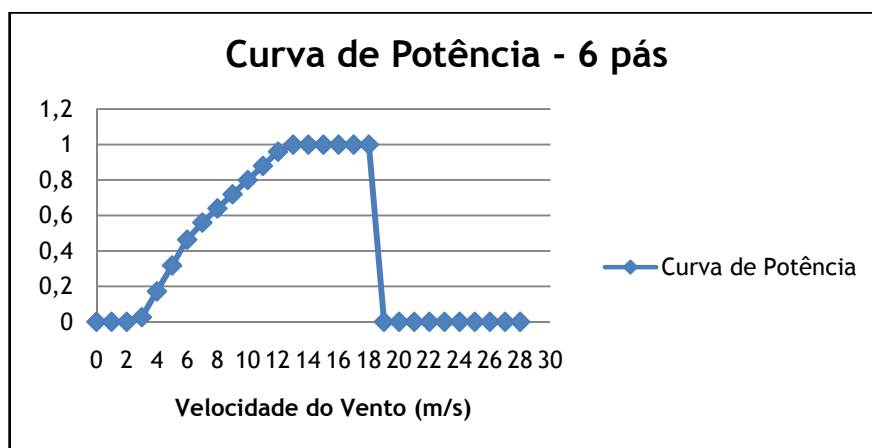


Figura 6.3 - Curva de potência para aerogeradores de 6 pás.

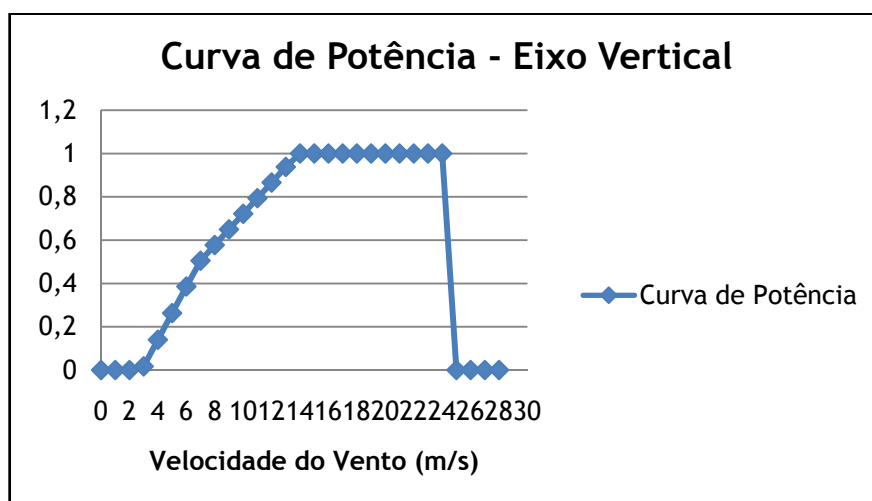


Figura 6.4 - Curva de potência para aerogeradores de 6 pás.

### 6.1.3. Cálculo do Coeficiente Máximo de Extracção de Potência do Vento (C)

Como foi verificado em 6.1.2 as curvas de potência variam consoante a velocidade do vento. Assim, foi calculado um coeficiente máximo de extracção de potência do vento, consoante a velocidade disponível no local de instalação. Para isso realizou-se uma distribuição de Weibull, com factor de escala de distribuição A (m/s) variável de 1 até 20 e factor adimensional de forma igual a 4,5, valor este que é o característico para zonas urbanas [75].

A expressão de cálculo utiliza uma função do MS Excel - WEIBULL, mas varia consoante os parâmetros introduzidos, como representado na equação 6.5:

$$Weibull(V_j; k; A; Verdadeiro) - Weibull(V_i; k; A; Verdadeiro) \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Onde

- i representa o valor de velocidade anterior;
- j representa o valor de velocidade em análise;
- V varia de 1 até 28 m/s como já tinha sido considerado no cálculo das curvas de potência.

Para  $v=0$ , considera-se nula a segunda parte da equação 6.5.

Depois de efectuada a distribuição de Weibull para calcular os valores de distribuição estatística da velocidade do vento, foi calculado o seu valor real de produção de energia eléctrica através do somatório do produto dos valores obtidos pelos valores característicos da curva de potência para a respectiva velocidade.

O valor teórico da produção de energia foi calculado através da ferramenta Solver do MS Excel aplicando a equação 6.6:

$$Teórico = a + b \times V + c \times V^2 + d \times V^3 \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Os valores de a, b, c e d foram obtidos tendo em conta a restrição de minimizar o erro, como expresso na equação 6.7:

$$\text{Restrição: } \text{Min}(\text{erro}) = (\text{Valor Real} - \text{Valor Calculado}) \quad (\text{Eq. 6.7})$$



Obtidos estes valores para cada valor de velocidade representaram-se os seguintes gráficos:

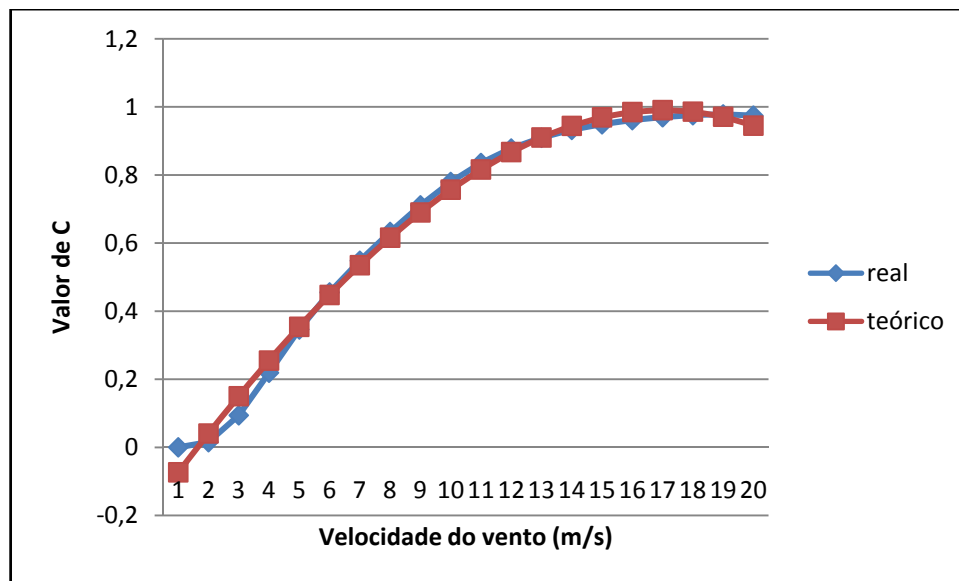


Figura 6.5 - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 2 pás.

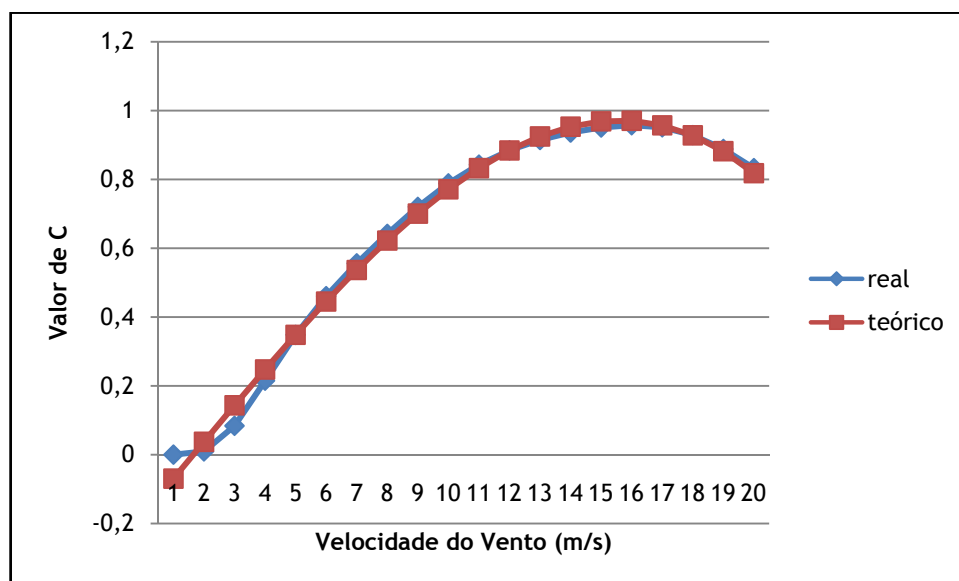
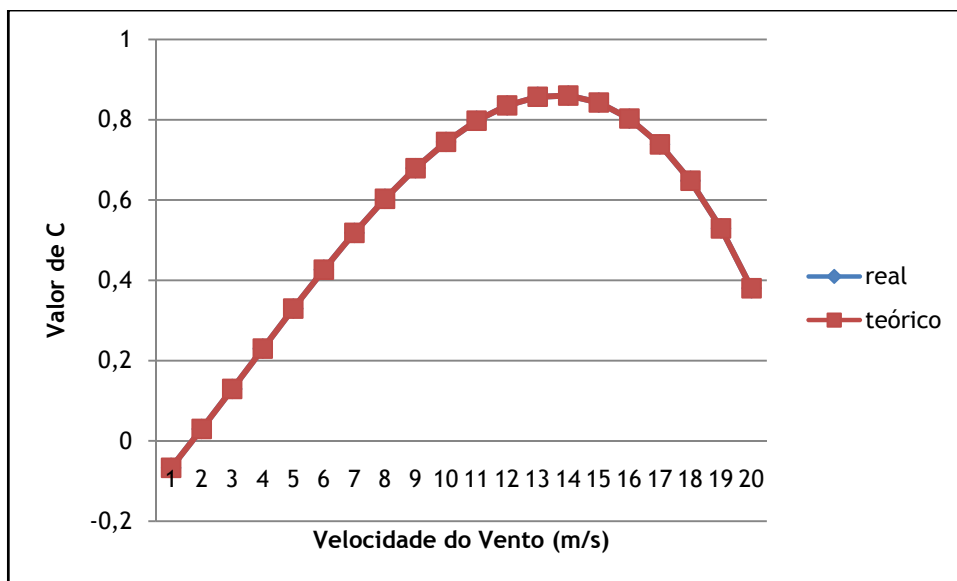
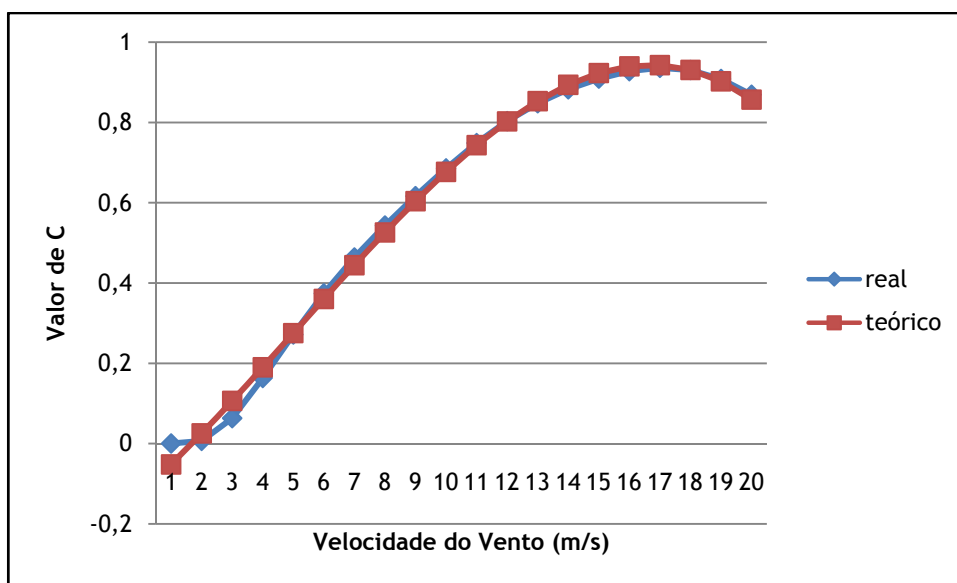


Figura 6.6 - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 3 pás.



**Figura 6.7** - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de 6 pás.



**Figura 6.8** - Produção real e teórica em função da velocidade do vento para aerogeradores de eixo vertical.

Através de uma regressão polinomial de 4ª ordem, aplicada aos gráficos 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8, encontrou-se uma expressão para cada aerogerador sendo possível obter o valor do coeficiente máximo de extração de potência ( $C$ ) para cada velocidade do vento, e consoante o tipo de aerogerador como expresso na tabela 6.5.

**Tabela 6.5** - Coeficiente máximo de extracção de potência para cada velocidade do vento.

V (m/s)	Coeficiente Máximo de extracção de Potência			
	2 pás	3 pás	6 pás	Eixo Vertical
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,041	0,037	0,030	0,025
3	0,151	0,142	0,130	0,107
4	0,256	0,245	0,232	0,191
5	0,355	0,344	0,333	0,277
6	0,449	0,437	0,432	0,363
7	0,537	0,524	0,527	0,448
8	0,619	0,603	0,616	0,532
9	0,694	0,674	0,698	0,612
10	0,762	0,735	0,770	0,688
11	0,823	0,784	0,831	0,758
12	0,876	0,821	0,879	0,821
13	0,920	0,844	0,912	0,877
14	0,957	0,853	0,929	0,923
15	0,984	0,846	0,927	0,959
16	0,999	0,821	0,905	0,983
17	0,999	0,778	0,861	0,994
18	0,999	0,715	0,793	0,992
19	0,998	0,632	0,700	0,974
20	0,976	0,527	0,579	0,940

Nesta tabela verifica-se, que o valor de C para  $V_{\text{vento}}=1$  (m/s) é forçado a 0 porque como esta velocidade é menor que a velocidade de “Cut-In” dos aerogeradores, estes não se encontram em funcionamento, porque a mesma não é suficiente para os colocar em funcionamento.

#### 6.1.4. Cálculo da Potência Nominal do Aerogerador em Função da Área de Varrimento

A partir das tabelas de características representadas em 6.1.1, realizou-se uma regressão linear para poder obter uma expressão em que se pode obter a potência nominal em função da área de Varrimento, pois o objectivo é poder encontrar a potência nominal mediante as características físicas do edifício onde será efectuada a instalação.

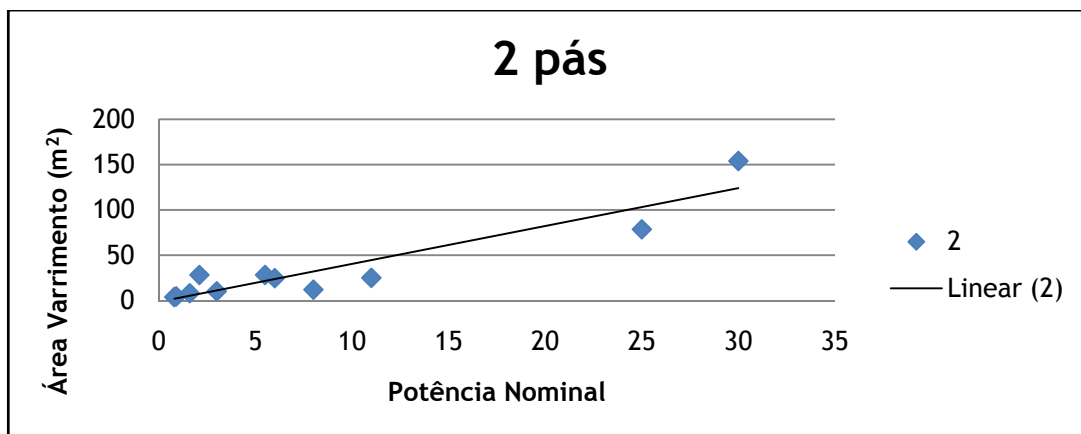


Figura 6.9 - Regressão linear para aerogeradores de 2 pás.

A expressão para o cálculo da Potência Nominal em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Potência_{nominal} = \frac{Área\ Varrimento + 1,3843}{4,1811} \quad (\text{Eq. 6.8})$$

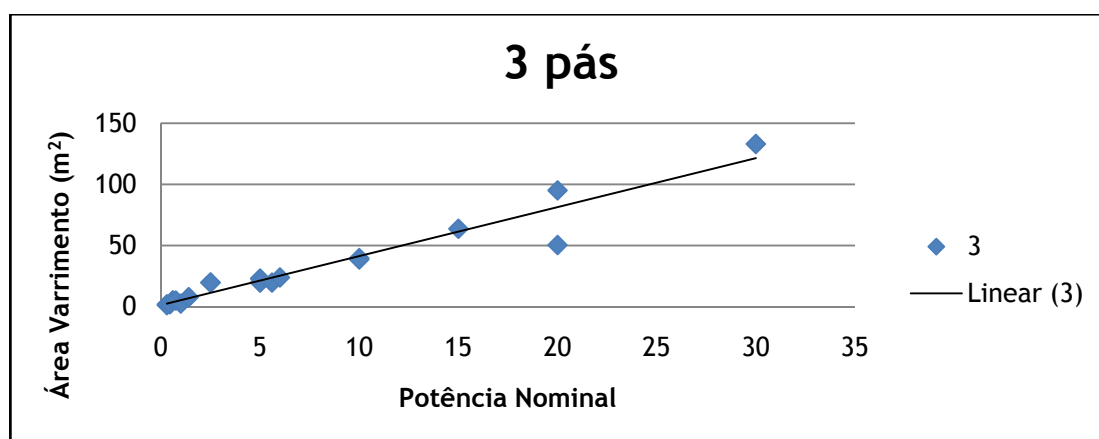


Figura 6.10 - Regressão linear para aerogeradores de 3 pás.

A expressão para o cálculo da Potência Nominal em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Potência_{nominal} = \frac{Área\ Varrimento - 1,2624}{4,0031} \quad (\text{Eq. 6.9})$$

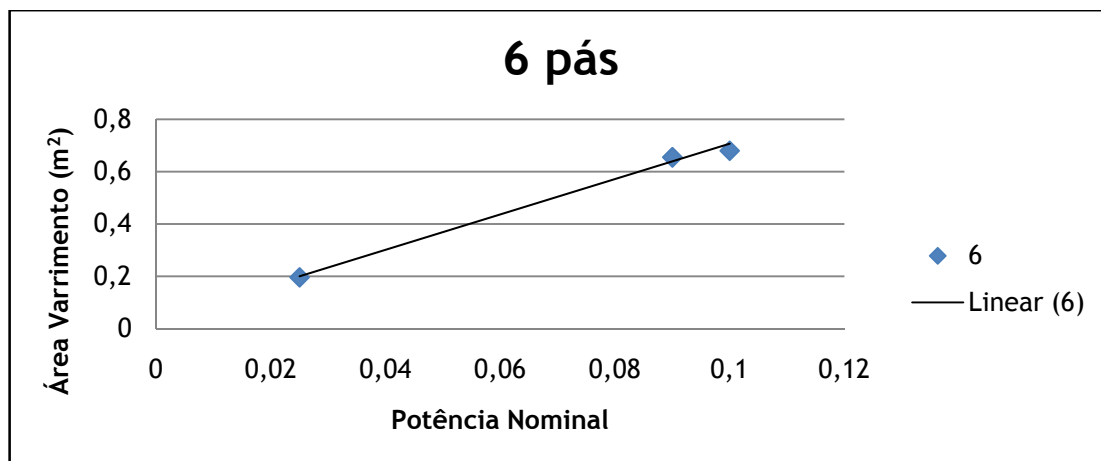


Figura 6.11 - Regressão linear para aerogeradores de 6 pás.

A expressão para o cálculo da Potência Nominal em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Potência_{nominal} = \frac{Área\ Varrimento - 0,0312}{6,758} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

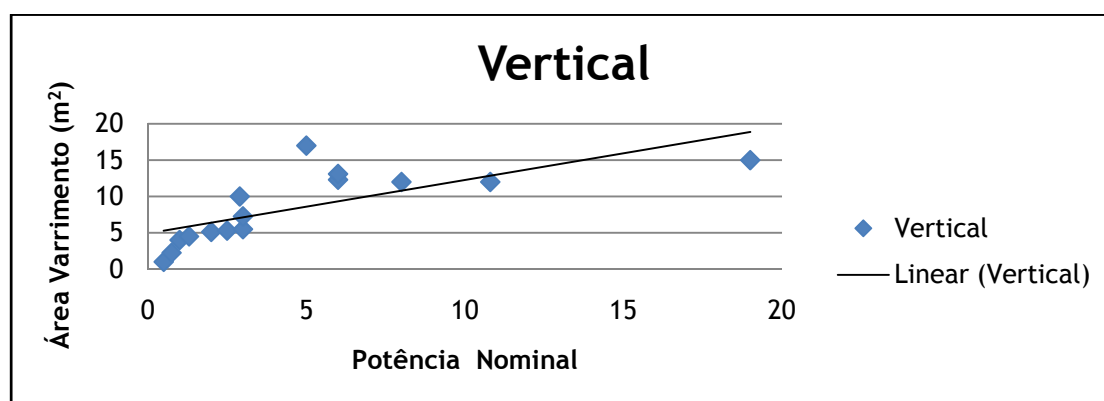


Figura 6.12 - Regressão linear para aerogeradores de eixo vertical.

A expressão para o cálculo da Potência Nominal em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Potência_{nominal} = \frac{Área\ Varrimento - 1,9082}{0,7346} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

De seguida através da recolha de diversas informações fornecidas por arquitectos, estipulou-se uma regra para o cálculo da área máxima de varrimento que será possível utilizar no edifício.

Mediante as características de construção, nomeadamente altura (h) e comprimento (c) estipulou-se que poderia ser instalado um aerogerador cujas dimensões não ultrapassassem um décimo da altura e um décimo do comprimento. Como um edifício em geral, não possui uma forma quadrada, adoptou-se para o cálculo da área de varrimento o menor dos dois valores obtidos como expresso nas equações seguintes:

$$h_{\text{varrimento}} = \frac{1}{10} \times h_{\text{edifício}} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

$$c_{\text{varrimento}} = \frac{1}{10} \times c_{\text{edifício}} \quad (\text{Eq. 6.13})$$

$$V_{\text{Área Varimento disponível}} = (\text{Min}(c_{\text{varrimento}}, h_{\text{varrimento}})) \quad (\text{Eq. 6.14})$$

Para aerogeradores de eixo vertical a área de varrimento é calculada pela área do “rectângulo” formado pelas medidas permitidas, ao contrário dos aerogeradores de eixo horizontal em que a área de varrimento corresponde a área do “círculo” formado pelas pás. As expressões de cálculo da área de varrimento são as representadas em 6.15 e 6.16.

$$\text{Área de Varimento}_{\text{Eixo Horizontal}} = 2 \times \pi \times \left(\frac{V}{2}\right)^2 \quad (\text{Eq. 6.15})$$

$$\text{Área de Varimento}_{\text{Eixo Vertical}} = (V)^2 \quad (\text{Eq. 6.16})$$

Em que V é o valor calculado pela equação 6.14.

#### 6.1.5. Cálculo do Custo de cada Aerogerador em Função da Área de Varrimento

Usando o mesmo método utilizado em 6.1.4, calculou-se o preço de um aerogerador mediante a sua área de varrimento.

Os gráficos e equações obtidas para as regressões lineares encontram-se representados em baixo:

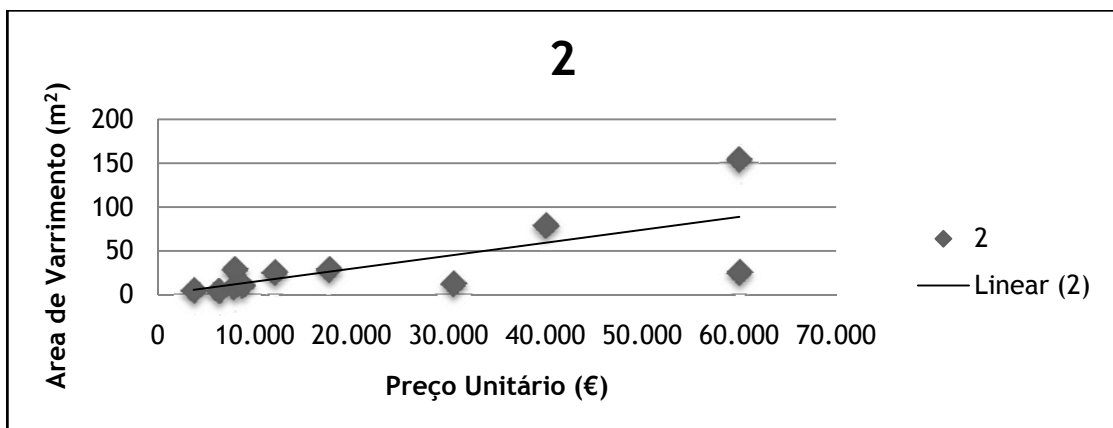


Figura 6.13 - Regressão linear para aerogeradores de 2 pás.

A expressão para o cálculo do preço de cada aerogerador em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Preço_{aerogerador} = \frac{Área\ Varrimento - 0,1044}{0,0015} \quad (\text{Eq. 6.17})$$

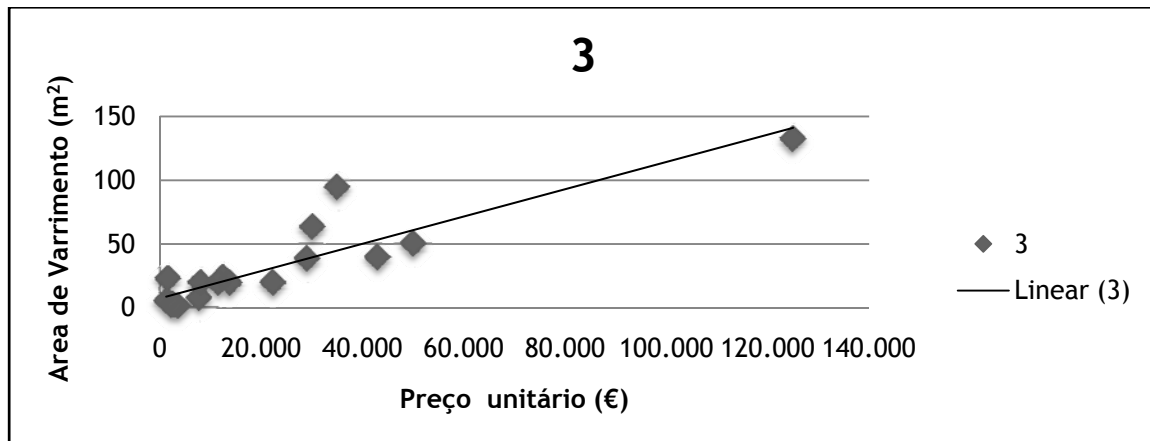


Figura 6.14 - Regressão linear para aerogeradores de 3 pás.

A expressão para o cálculo do preço de cada aerogerador em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Preço_{aerogerador} = \frac{Área\ Varrimento - 7,328}{0,0011} \quad (\text{Eq. 6.18})$$

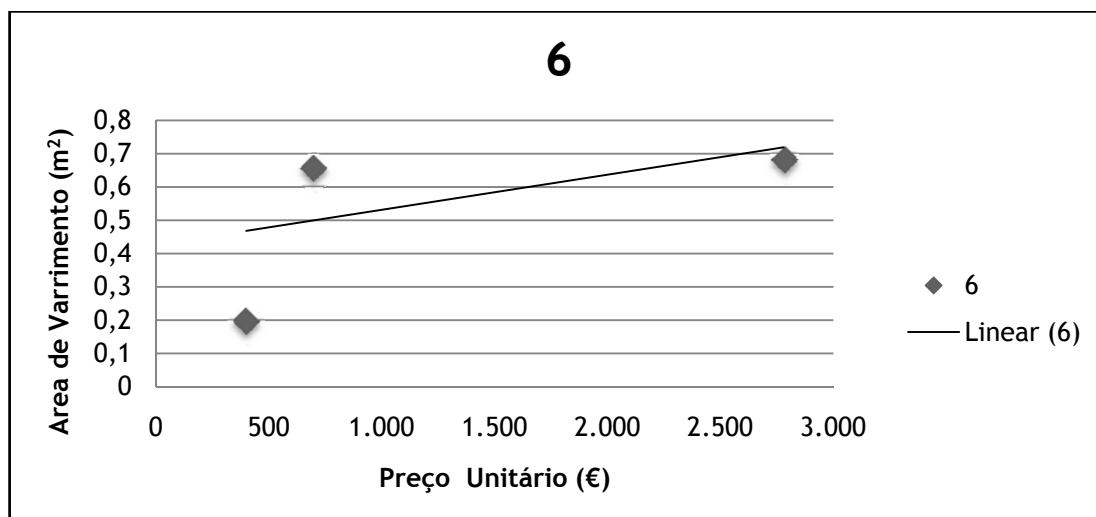


Figura 6.15 - Regressão linear para aerogeradores de 6 pás.

A expressão para o cálculo do preço de cada aerogerador em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Preço_{aerogerador} = \frac{Área\ Varrimento - 0,4257}{0,0001} \quad (\text{Eq. 6.19})$$

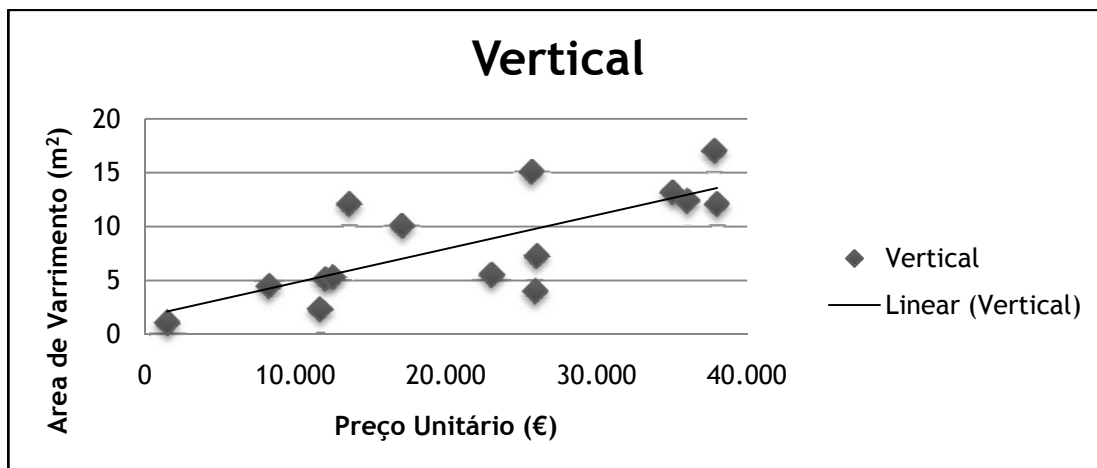


Figura 6.16 - Regressão linear para aerogeradores de eixo vertical.

A expressão para o cálculo do preço de cada aerogerador em função da Área de Varrimento disponível é:

$$Preço_{aerogerador} = \frac{Área\ Varrimento - 1,653}{0,0003} \quad (\text{Eq. 6.20})$$

Representaram-se também os gráficos correspondentes ao Preço/kW de cada aerogerador pela potência nominal, através de uma regressão logarítmica, como representados de seguida.

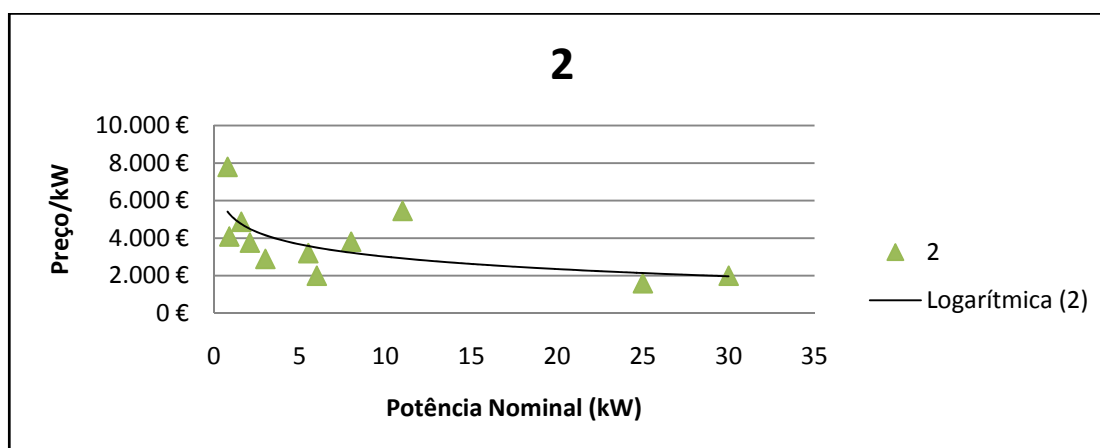


Figura 6.17 - Regressão logarítmica para aerogeradores de 2 pás.



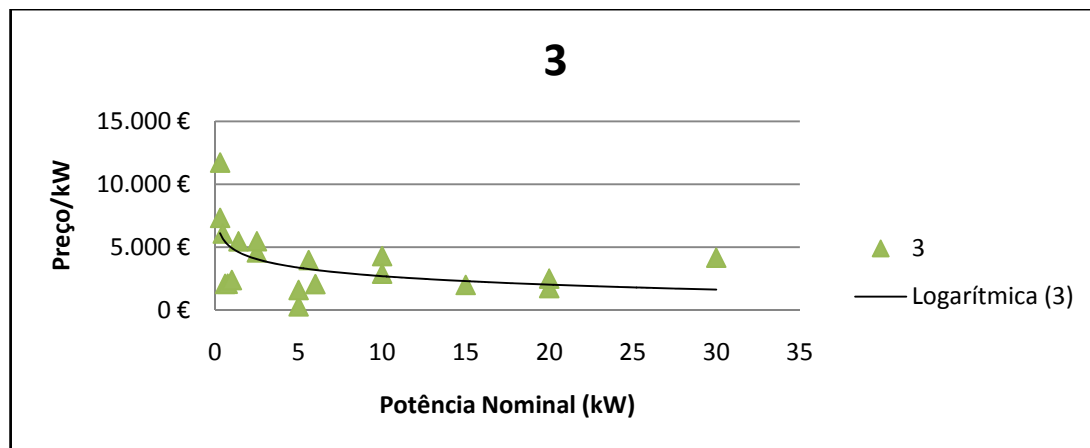


Figura 6.18 - Regressão logarítmica para aerogeradores de 3 pás.

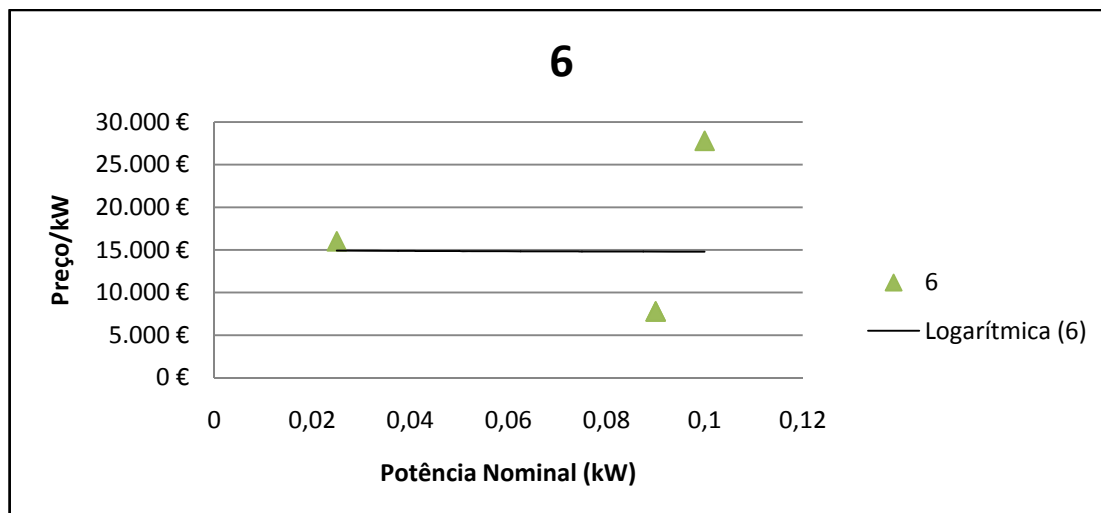


Figura 6.19 - Regressão logarítmica para aerogeradores de 6 pás.

Devido à falta de dados referentes a aerogeradores de 6 pás não se pôde obter uma regressão logarítmica mais aproximada.

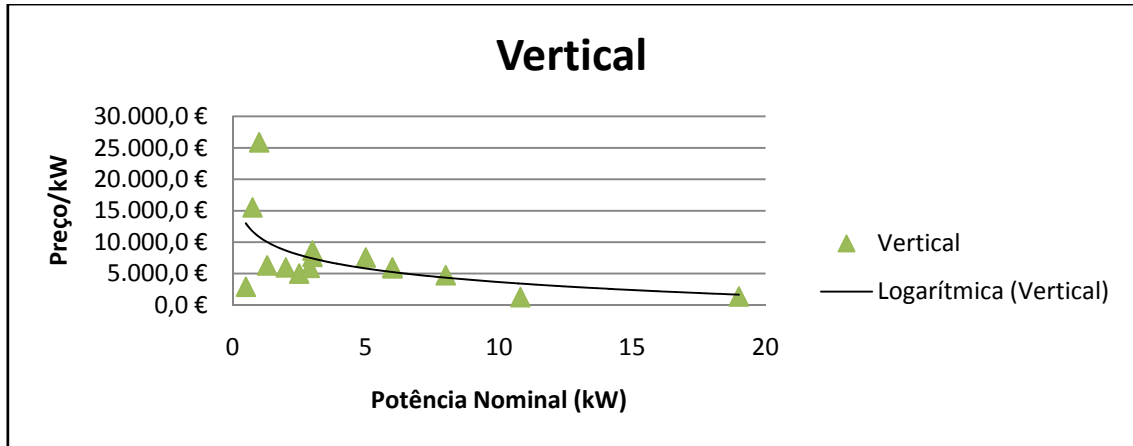


Figura 6.20 - Regressão logarítmica para aerogeradores de eixo vertical.

Era de esperar que a relação Preço/kW fosse aproximada a uma exponencial logarítmica [a4].

#### 6.1.6. Número de Aerogeradores por Edifício

Os aerogeradores devem estar distanciados entre si por uma distância igual a 5 vezes o seu diâmetro [75].

Logo, consoante as dimensões do edifício e do diâmetro da área de varrimento um edifício pode suportar mais do que um aerogerador, respeitando as restrições seguintes para aerogeradores de eixo horizontal:

$$N_{aerogeradores\_Largura}^o = \frac{Largura\ do\ Edificio}{5 \times d} \quad (Eq. 6.21)$$

$$N_{aerogeradores\_Comprimento}^o = \frac{Comprimento\ do\ Edificio}{5 \times d} \quad (Eq. 6.22)$$

$$Total_{aerogeradores} = N_{aerogeradores\_Largura}^o \times N_{aerogeradores\_Comprimento}^o \quad (Eq. 6.23)$$

Em que d representa o diâmetro da área de varrimento do aerogerador a instalar no edifício, depois de aplicadas as equações 6.15 e 6.16 (presentes no ponto 6.1.4 )

Para aerogeradores de eixo vertical as equações são:

$$N_{aerogeradores\_Largura}^o = \frac{Largura\ do\ Edificio}{5 \times v} \quad (Eq. 6.24)$$

$$N_{aerogeradores\_Comprimento}^o = \frac{Comprimento\ do\ Edificio}{5 \times v} \quad (Eq. 6.25)$$

$$Total_{aerogeradores} = N_{aerogeradores\_Largura}^o \times N_{aerogeradores\_Comprimento}^o \quad (Eq. 6.26)$$

Em que v é o valor da largura do aerogerador de eixo vertical

### 6.1.7. Correção do Valor da Velocidade do Vento para a Altura do Edifício

Os valores médios mensais da velocidade do vento para a cidade do Porto foram obtidos através do U.S. Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy [76].

Os valores obtidos encontram-se indicados na tabela 6.6:

Tabela 6.6 - Valores da velocidade média na cidade do Porto.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
V (m/s)	2,8	4	3,9	3,3	4,1	1,6	3,2	2,2	1,9	3,7	3,1	1,9	2,98

A medição das velocidades médias mensais ocorre a 10 metros de altura relativamente ao solo, logo é necessário efectuar a correção da velocidade do vento para a altura do edifício de instalação, correção esta que pode ser feita, tendo em conta a altura do edifício e as características de rugosidade do local como explicado no Capítulo 4.

A expressão que permite corrigir o valor da velocidade de vento para a altura de instalação é:

$$V_x = V_{10} \times \left( \frac{h_{\text{instalação}}}{h_{10}} \right)^\alpha \quad (\text{Eq. 6.27})$$

em que:

- $\alpha$  representa o coeficiente de rugosidade do terreno, e como apresentado no Capítulo 4 o seu valor para ambiente urbano é 0,4.

- $h_{\text{instalação}}$  representa a altura do edifício mais a altura da torre.

Considerou-se uma torre de 3 metros, pois é a altura indicada para ultrapassar os efeitos de turbulência existentes num edifício, mas sempre tendo em atenção a relação entre a área de varrimento disponível e a altura da torre, podendo esta ser por vezes superior a 3 metros.

Depois de obtido este valor da velocidade, verifica-se qual o valor do coeficiente máximo de extracção de potência (C) para a velocidade obtida segundo os gráficos 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8.

## 6.2. Energia Produzida pelo Sistema Micro Eólico

Obtida a Potência Nominal do aerogerador, o número de aerogeradores a instalar e a velocidade do vento na altura de instalação, pode fazer-se uma estimativa da energia produzida pelo sistema através da equação 6.28:

$$E = P_{\text{nominal}} \times 8760 \times C \times n_{\text{aerogeradores}} \quad (\text{Eq. 6.28})$$

em que:

-8760 representa o número de horas de um ano;

-C é o coeficiente máximo de extracção de Potência calculado em 6.1.3;

- $n_{\text{aerogeradores}}$  representa o número de aerogeradores instalados.

### 6.3. Custo Nivelado de Energia

Para o custo final dos aerogeradores, considerou-se que o custo de Instalação é cerca de 1000€ por aerogerador e que o custo de O&M era cerca de 1% do custo de cada aerogerador [a4].

É necessário calcular o Custo Nivelado de Energia através das seguintes equações 6.29 e 6.30:

$$CNE = \frac{\sum_e(\tau_e \times I)}{EAP} \quad (\text{Eq. 6.29})$$

sendo:

$$\tau_e = \frac{i \times (1+i)^{n_e}}{(1+i)^{n_e} - 1} \quad (\text{Eq. 6.30})$$

em que:

- CNE representa o custo nivelado de energia (€/kWh);
- I é o investimento total no ano 0 para a instalação já contabilizando a O&M (€);
- EAP a energia anual produzida (kWh/ano);
- $\tau_e$  o factor de anualização para o equipamento;
- i taxa de actualização (7%);
- $n_e$  o tempo de vida do equipamento.

O tempo de vida de um sistema eólico é sempre superior a 15 anos, sendo aconselhado considerar cerca de 20 anos [75].

### 6.4. CO<sub>2</sub> Evitado

À semelhança do Capítulo 5 a opção de utilizar as tecnologias baseadas em fontes renováveis, para além de contribuírem para a redução da factura mensal de electricidade, evita a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Tendo em consideração o factor de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), associado à produção de electricidade do SEN, 470g CO<sub>2</sub>/kWh pode-se calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado e a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado por € investido através das seguintes equações: [74]

$$CO_{2\text{produzido tecnologia convencional}} = 0,47 \times E_{\text{produzida pelo SFV}} \quad (\text{Eq. 6.31})$$

Para calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado por cada € investido usou-se a expressão 6.30:

$$CO_{2\text{evitado}}/\text{ano}/\text{€investido} = \frac{CO_{\text{evitado}}}{\text{Total do investimento}} \quad (\text{Eq. 6.32})$$

## 6.5. Resultados

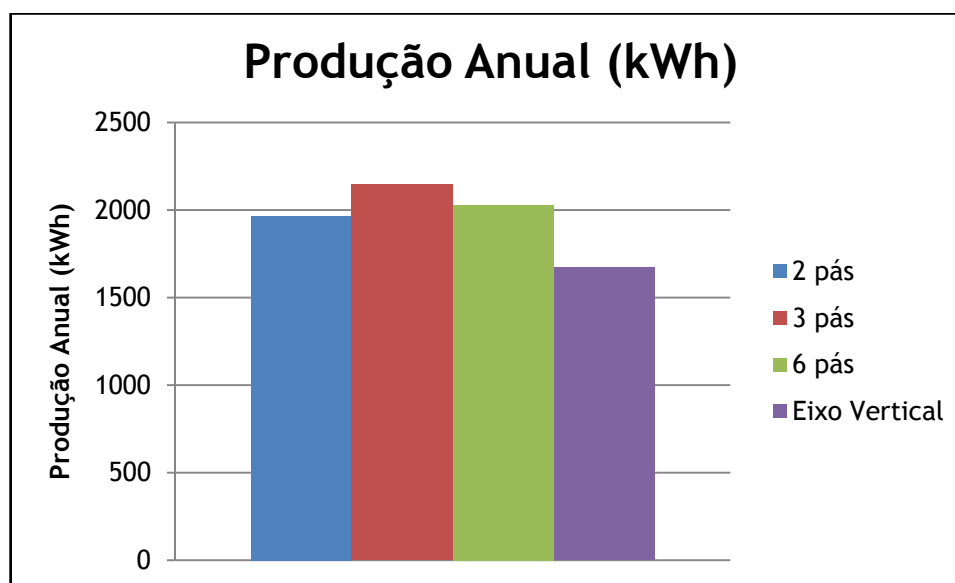
Os resultados aqui apresentados foram obtidos considerando que os aerogeradores são de 1 kW de potência nominal, e que só existe 1 por tipo de aerogerador e que foram instalados num local com as mesmas características para se poder efectuar uma comparação da sua produção anual e custos.

O local de instalação escolhido foi o Porto e a altura de instalação foi de 18 metros, já contabilizando a torre do aerogerador.

Os resultados obtidos encontram-se expressos na tabela 6.7:

**Tabela 6.7** - Produção de cada aerogerador de 1 kW.

Tipo de Aerogerador	Eixo Horizontal			Eixo Vertical
	2 Pás	3 Pás	6 Pás	----
<b>Produção Anual (kWh)</b>	1967	2147	2030	1673
<b>Investimento Total (€)</b>	6262	2260	14549	2996
<b>Custo Nivelado de Energia (€/kWh)</b>	0,27	0,09	0,62	0,15
<b>kg CO<sub>2</sub> evitado</b>	924,64	1009,13	953,96	786,39
<b>kg CO<sub>2</sub> evitado/ano/€ investido</b>	0,15	0,45	0,07	0,26



**Figura 6.21** - Gráfico representativo da produção anual de cada aerogerador.

## 6.6. Conclusões

Através da análise do gráfico 6.21, pode concluir-se que as turbinas com uma maior produção são as de eixo horizontal de 3 pás. Em último lugar ficam as turbinas de eixo vertical.

As turbinas de eixo horizontal de 2 e 6 pás respectivamente encontram-se muito próximas em termos de produção, residindo a sua diferença no custo do investimento, sendo o de aerogeradores de 6 pás cerca de 2,3 vezes maior que o preço de aerogeradores de 2 pás.

Em relação ao custo nivelado de energia, como seria de esperar devido à relação preço produção, os aerogeradores de 3 pás possuem o melhor custo nivelado. Já os aerogeradores de eixo vertical possuem o segundo melhor valor de CO<sub>2</sub> evitado por ano por € investido e custo nivelado de energia porque o seu custo total é bastante reduzido quando comparado com os outros aerogeradores (2 e 6 pás) com produções maiores.

Neste caso concreto, de velocidade do vento reduzida e potência nominal igual, verifica-se que compensa instalar aerogeradores de eixo horizontal de 3 pás.



## Capítulo 7

### Caso de Estudo

Neste capítulo, foi verificado a título de exemplo a integração de energias renováveis num edifício de escritórios novo energeticamente eficiente (Classe A+ do Sistema de Certificação de Edifícios) [77]. Verificou-se também para um edifício residencial, considerando que as características do edifício eram as mesmas.

Um edifício de classe A+ corresponde a um edifício com um desempenho energético muito elevado no Sistema de Certificação de Energia.

#### 7.1. Resultados

##### 7.1.1. Escritórios

O estudo em causa foi realizado para a cidade do Porto.

O consumo energético (energia primária) de um edifício com esta classe de eficiência será no máximo 23,75 kgep/m<sup>2</sup>ano, obtido através da equação 7.1 [78].

$$IEE_{nom} = IEE_{ref} - 0,75 \times S \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Em que:

-IEE<sub>nom</sub> é o índice de eficiência energética nominal

-IEE<sub>ref</sub> =35 - é o índice de eficiência energética de referência (valor indicado no anexo XI do RSECE para edifícios novos da tipologia em análise).

-S=15 é a soma dos consumos específicos para aquecimento, arrefecimento e iluminação conforme determinados na simulação dinâmica que deu origem aos valores limites de referência para edifícios novos que constam no regulamento.

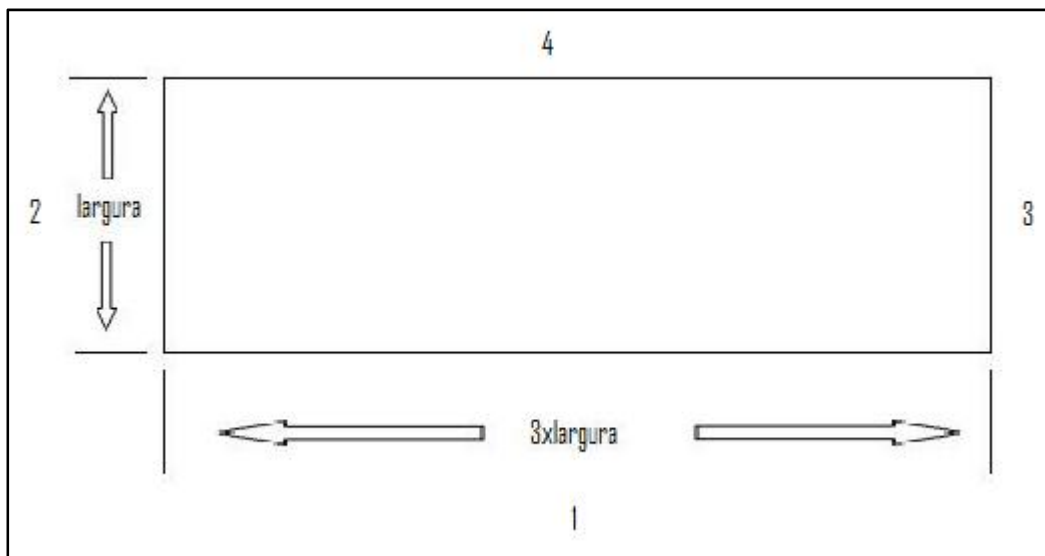
Admitindo que este consumo é totalmente de energia eléctrica e utilizando o coeficiente de conversão de energia primária em energia eléctrica que consta no DL 78/2006 (0,29 Kgep/kWh<sub>el</sub>) aos valores de energia primária acima indicados corresponde um consumo de energia eléctrica de:



$$E_{Elétrica} = \frac{E_{Primária}}{0,29} \quad (\text{Eq. 7.2})$$

$$E_{Elétrica} = 81,89 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$$

Admitindo ainda que o edifício apresenta a configuração geométrica da figura 7.1:



**Figura 7.1** - Dimensões do edifício em análise.

A largura considerada foi de 15 m, logo, o comprimento é de 45 m, e assumiu-se que o edifício possui 5 pisos, com uma altura por piso de 3 m o que corresponde a uma altura de 15 m.

#### 7.1.1.1. Microgeração Fotovoltaica

A área por piso do edifício é de 675 m<sup>2</sup>. Deste modo o consumo total por piso é 55275 kWh/ano. O consumo total para o edifício é de 276,378 MWh/ano.

A fachada 1 (área igual a 675 m<sup>2</sup>) é virada a Sul, a Fachada 2 e 3 (área igual a 225 m<sup>2</sup>) viradas a Oeste e Este respectivamente e a fachada 4 (área igual a 675 m<sup>2</sup>) virada a Norte.

Considerou-se também que 50% da área das fachadas incluía janelas, deste modo a área disponível para painéis fotovoltaicos fica reduzida em 50% em cada fachada.

Considerou-se que a envolvente às fachadas é composto por relva, logo  $\rho=0,3$  para o cálculo da radiação do Albedo.

São apresentados dois resultados, um reflectindo a inclinação óptima ( $\beta=35^\circ$ ), e outro uma inclinação de 0 graus para a cobertura.

As produções obtidas para estas áreas disponíveis foram:

**Tabela 7.1 e 7.2 - Produções para a cobertura.**

<b>Produção Anual (<math>\beta=35^\circ</math>)</b>
<b>(kWh)</b>
<b>100665</b>

<b>Produção Anual (<math>\beta=0^\circ</math>)</b>
<b>(kWh)</b>
<b>95098</b>

Para a radiação total da cobertura não se incluiu a radiação do Albedo, e considerou-se apenas um aproveitamento de 70% da área disponível, considerando deste modo a existência de espaço para manutenção e distâncias entre painéis ocupadas pela caixilharia inerente ao painel.

**Tabela 7.3 - Produção fachada nº 1.**

<b>Produção Anual (kWh)</b>
<b>59704</b>

**Tabela 7.4 - Produção fachada nº 2 e 3.**

<b>Produção Anual (kWh)</b>
<b>14143</b>

Este é o valor de uma das fachadas, por isso, as duas fachadas produzem 28,286 MWh/ano.

**Tabela 7.5 - Produção fachada nº 4.**

<b>Produção Anual (kWh)</b>
<b>34254</b>

A Produção Total Anual para  $\beta=35$  é igual a 222,909 MWh/ano.

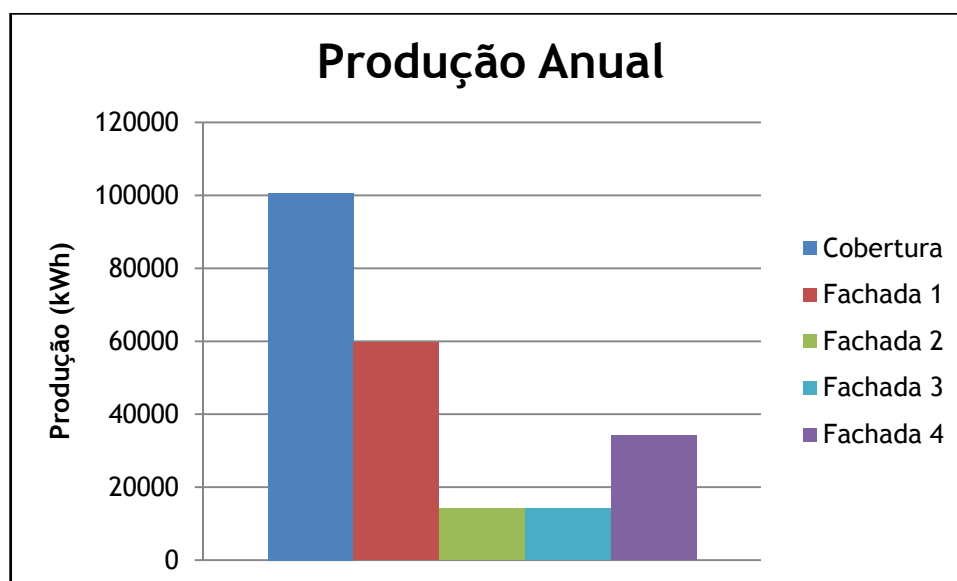
A Produção Total Anual para  $\beta=0$  é igual a 217,342 MWh/ano.

De seguida são apresentados os valores de produção e respectivo custo de investimento.

Considerando a cobertura com inclinação  $\beta=35^\circ$  os valores obtidos foram:

**Tabela 7.6** - Valores obtidos para inclinação da cobertura igual a  $35^\circ$ .

FV	Produção Anual (kwh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentavel?	€/k Wh
Cobertura	100665	361463	47313	36,42%	Não	0,31
Fachada 1	59704	258188	28061	21,60%	Não	0,41
Fachada 2	14143	86063	6647	5,12%	Não	0,57
Fachada 3	14143	86063	6647	5,12%	Não	0,57
Fachada 4	34254	258188	16099	12,39%	Não	0,71



**Figura 7.2** - Representação gráfica da produção de FV no edifício.

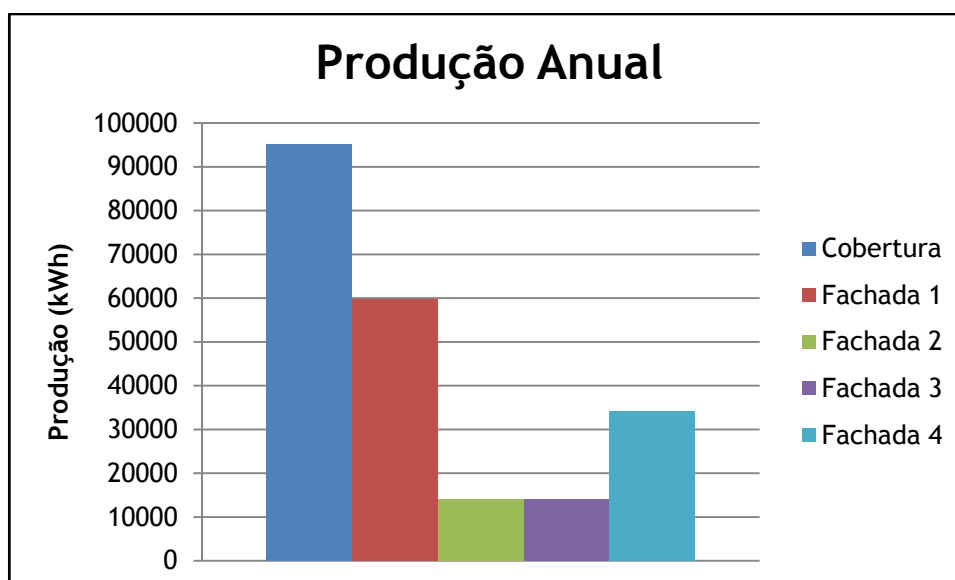
**Tabela 7.7** - Produção Anual versus Consumo Anual.

Produção vs Consumo
80,65%

Considerando a cobertura com inclinação igual a  $\beta=0^\circ$  os valores obtidos foram:

**Tabela 7.8** - Valores obtidos para inclinação da cobertura igual a  $0^\circ$ .

FV	Produção Anual (kWh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentável?	€/kWh
Cobertura	95098	361463	44696	34,41%	Não	0,36
Fachada 1	59704	258188	28061	21,60%	Não	0,41
Fachada 2	14143	86063	6647	5,12%	Não	0,57
Fachada 3	14143	86063	6647	5,12%	Não	0,57
Fachada 4	34254	258188	16099	12,39%	Não	0,71



**Figura 7.3** - Representação gráfica da produção do edifício.

**Tabela 7.9** - Produção anual versus consumo anual.

Produção FV vs Consumo
78,64%

### Preço Total do Investimento

O preço total de ambos os investimentos para se obterem estas produções é de 1.049.963 €. Em relação ao CO<sub>2</sub> evitado os valores obtidos foram:

Tabela 7.10 - Valores obtidos mediante inclinação da cobertura.

Instalação	Cobertura ( $\beta=35^\circ$ )	Cobertura ( $\beta=0^\circ$ )
Produção Anual (kWh)	222909	217342
Investimento Total (€)	1049963	1049963
kg CO <sub>2</sub> evitado	104768	102151
kg CO <sub>2</sub> evitado/ano/€ investido	0,10	0,10

#### 7.1.1.2. Microgeração Eólica

Assumindo os valores de velocidade indicados anteriormente no Capítulo 6:

Tabela 7.11 - Valores da velocidade média na cidade do Porto.

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
V (m/s)	2,8	4	3,9	3,3	4,1	1,6	3,2	2,2	1,9	3,7	3,1	1,9	2,98

#### Aerogerador de 2 pás:

Para as características do edifício apresentado, é possível instalar 12 aerogeradores de potência nominal igual a 0,76 kW, sendo a sua produção igual a:

Tabela 7.12 - Produção de aerogeradores de 2 pás.

Produção Anual (kWh)
20247

### Aerogerador de 3 pás:

Para as características do edifício apresentado, é possível instalar 12 aerogeradores de potência nominal igual 0,12 kW, sendo a sua produção igual a:

**Tabela 7.13** - Produção de aerogeradores de 3 pás.

Produção Anual (kWh)
3248

### Aerogerador de 6 pás:

Para as características do edifício apresentado, é possível instalar 12 aerogeradores sendo a sua potência nominal igual a 0,25 kW, sendo a sua produção igual a:

**Tabela 7.14** - Produção de aerogeradores de 6 pás.

Produção Anual (kWh)
6256

### Aerogerador de Eixo Vertical:

Para as características do edifício apresentado, é possível instalar 12 aerogeradores de potência nominal igual a 0,46 kW, sendo a sua produção igual a:

**Tabela 7.15** - Produção de aerogeradores de eixo vertical pás.

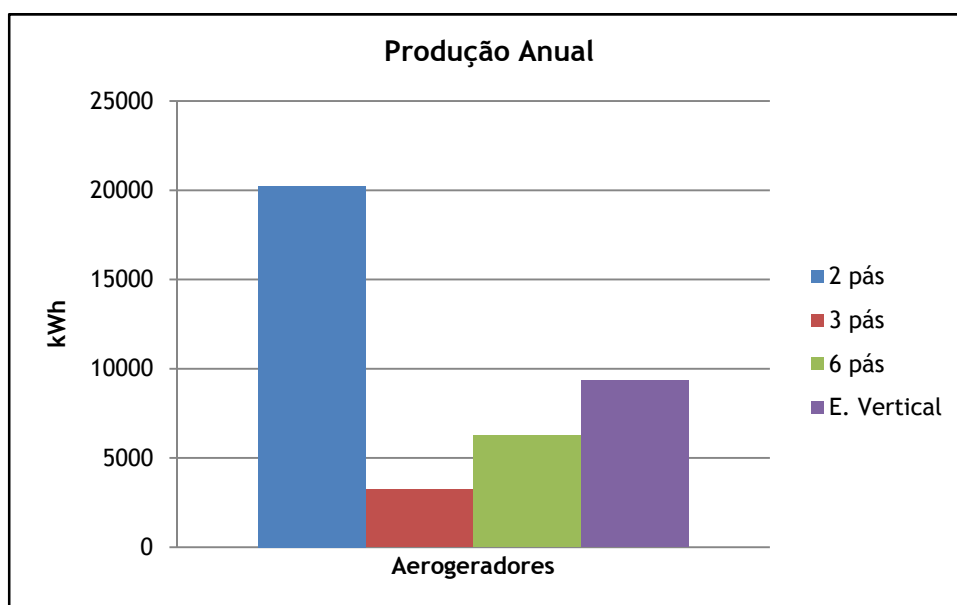
Produção Anual (kWh)
9342

Resumidamente os valores obtidos foram:

**Tabela 7.16** - Valores obtidos para cada aerogerador.

Eólica	Produção Anual (kwh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentável ?	€/kW h
2 pás	20247	75146	9515	7,52%	Não	0,32
3 pás	3248	27122	1527	1,21%	Não	0,71
6 pás	6256	174583	2941	2,32%	Não	2,39
E. Vertical	9342	35957	4391	3,47%	Não	0,33

Como era de esperar a potência nominal de cada aerogerador depende da área de varrimento disponível, logo obtiveram-se potências nominais diferentes e desse modo as produções anuais também variaram bastante.



**Figura 7.4** - Representação gráfica da produção dos aerogeradores.

Nenhuma das soluções encontradas pode tornar o edifício em estudo sustentável, por isso poder-se-ia tentar encontrar uma solução que combine microgeração eólica com microgeração fotovoltaica.

### 7.1.2. Residencial

A tipologia considerada alberga na área disponível aproximadamente 2 (T3) e 3 (T2) por piso. No total são 10 (T3) e 15 (T2).

Considerando um consumo típico de um apartamento T3 igual a 3140 kWh/ano, e de um T2 2287 kWh/ano, o consumo total do edifício é de 65,705 MWh/ano.

Foi considerado que todos estes consumos são totalmente de energia eléctrica.

Como a tipologia do edifício é a mesma, e a orientação considerada também é a mesma, as produções de ambos os sistemas (fotovoltaico e eólico) são iguais às obtidas no ponto 7.1.1, podendo deste modo passar à comparação do consumo anual do edifício com a produção anual dos sistemas.

#### 7.1.2.1. Microgeração Fotovoltaica

Em relação ao sistema fotovoltaico, como a produção da cobertura, independentemente da inclinação, é superior ao consumo, é suficiente utilizar só a cobertura para suprir o consumo anual, e mesmo assim utilizando a área total a sua produção é ainda superior.

Pode-se então considerar duas opções, manter a produção utilizando a área disponível, ou encontrar um valor de produção mais próximo do consumo, minimizando a área coberta pelo sistema fotovoltaico.

Utilizando a área total disponível na cobertura obtêm-se as seguintes produções anuais de energia:

**Tabela 7.17 e 7.18 - Produções para a cobertura.**

Produção Anual ( $\beta=35^\circ$ ) (kWh)
100665
Produção Anual ( $\beta=0^\circ$ ) (kWh)
95098

**Tabela 7.19 - Resultados obtidos para a cobertura considerando aproveitamento máximo da área disponível.**

FV	Produção Anual (kWh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentável?	€/kWh
Cobertura ( $\beta=35^\circ$ )	100665	361463	47313	153,21%	Sim	0,31
Cobertura ( $\beta=0^\circ$ )	95098	361463	44696	144,73%	Sim	0,36



Como se pode ver, existe um excedente de produção, por isso tentou encontrar-se um valor de área necessária para que os consumos sejam supridos 100%.

Para uma inclinação de 35 graus a área necessária é de 308,5m<sup>2</sup>, para uma inclinação de 0 graus a área aumentou para 326,5m<sup>2</sup>.

**Tabela 7.20** - Resultados obtidos para a cobertura considerando apenas a área necessária para suprir em 100% o consumo.

FV	Produção Anual (kwh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentável?	€/k Wh
Cobertura ( $\beta=35^\circ$ )	65725	236003	30891	100%	Sim	0,31
Cobertura ( $\beta=0^\circ$ )	65713	249773	30885	100%	Sim	0,36

### 7.1.2.2. Microgeração Eólica

Como os cálculos para a produção eólica não dependem da área disponível, mas sim das dimensões do edifício, as produções obtidas no ponto 7.1.1.2 são as mesmas, havendo diferenças na quantidade de CO<sub>2</sub> evitado e na percentagem de sustentabilidade assegurada.

Os resultados obtidos foram:

**Tabela 7.21** - Valores obtidos para cada aerogerador.

Eólica	Produção Anual (kwh)	Investimento (€)	kg CO <sub>2</sub> Evitado	Percentagem em relação ao consumo	Sustentável?	€/kW h
2 pás	20247	75146	9515	30,82%	Não	0,32
3 pás	3248	27122	1527	4,94%	Não	0,71
6 pás	6256	174583	2941	9,52%	Não	2,39
E. Vertical	9342	35957	4391	14,22%	Não	0,33

Verifica-se que mesmo reduzindo os consumos, passando de um edifício de escritórios para um edifício residencial as produções não conseguem tornar o edifício sustentável.

## 7.2. Certificação de Edifícios Não Residenciais para Classe A+

Para se transformar um edifício de escritórios novo (edifício não residencial) ao qual tenha sido atribuído conformidade regulamentar num edifício A+ é necessário obedecer a alguns parâmetros. Um desses parâmetros passa por incluir integração de energias renováveis no edifício. A título de exemplo considerou-se a energia fotovoltaica. Para isso pode-se calcular a área necessária de painéis fotovoltaicos para que ocorra esta migração.

Um edifício novo de escritórios deve ter um consumo de energia primária não superior a 35 kgep/m<sup>2</sup>ano. Sabendo que o consumo de um edifício A+ é de 23,75 kgep/m<sup>2</sup>ano, a diferença entre eles é de 11,25 kgep/m<sup>2</sup>ano.

Convertendo para energia eléctrica este valor corresponde a 38,79kWh/m<sup>2</sup>ano.

Assumindo que o edifício se encontra virado a Sul (por uma questão de cálculo mais simples) sabe-se que a produção de um sistema fotovoltaico é cerca de 213,05 kWh/m<sup>2</sup>ano (valor obtido através do cálculo efectuado no Capítulo 5), pode-se calcular a área de fotovoltaicos necessários em função da área útil do edifício:

$$\text{Área necessária} = \frac{38,79}{213,05} = 0,18 \frac{m_{FV}^2}{m_{\text{util de pavimento}}^2} \quad (\text{Eq. 7.3})$$

## 7.3. Conclusões

### 7.3.1. Sistema Fotovoltaico

#### 7.3.1.1. Escritórios

Neste exemplo de edifício considerado, conseguiu obter-se uma satisfação do consumo de 80,65% considerando uma inclinação da cobertura de 35° e de 78,64%, considerando que os painéis se encontravam sem inclinação na cobertura.

O custo total para se obter estes níveis de satisfação de consumo é que é extremamente elevado sendo cerca de 1.049.963 €, preço obviamente elevado.

#### 7.3.1.2. Residencial

Pode concluir-se que como o consumo é muito inferior ao consumo de um edifício de escritórios, neste caso em concreto, bastaria cobrir a cobertura para poder satisfazer os consumos anuais.

Conclui-se também que para a inclinação óptima ( $\beta=35^\circ$ ) é necessária menos área do que para um inclinação de 0 graus de modo a satisfazer os consumos do edifício.

Como seria de esperar, o custo total também diminuiu para 236.003 € ( $\beta=35^\circ$ ) e 249.773 € ( $\beta=0^\circ$ ). Como as áreas diferem, o seu custo é também diferente, sendo mais elevado para  $\beta=0^\circ$  porque necessita de mais área disponível para conseguir obter uma produção igual ao consumo do edifício.

### **7.3.2. Sistema Eólico**

#### **7.3.2.1. Escritórios**

Neste exemplo de edifício considerado, a solução em termos de produção e de CO<sub>2</sub> evitado recairia num aerogerador de eixo horizontal de 2 pás, devido à sua elevada produção, mas em termos de custo seria a opção de aerogeradores de eixo horizontal de 3 pás a mais económica.

Em relação ao custo nivelado de energia, os aerogeradores de eixo vertical são aqueles que possuem o melhor valor.

#### **7.3.2.2. Residencial**

Apesar da redução dos consumos, ainda assim não se conseguiu satisfazer totalmente os mesmos, apesar do aumento substancial da percentagem satisfeita em relação ao edifício de escritórios.

Em relação à escolha do aerogerador, como este depende das características físicas do edifício e estas não se alteraram de um edifício para outro a escolha seria a mesma efectuada para o edifício de escritórios.

## Capítulo 8

# Conclusões e Perspectivas Futuras

Nesta dissertação procurou-se avaliar a viabilidade da integração de recursos energéticos endógenos em edifícios, através da comparação das produções obtidas com os consumos anuais do edifício, verificando qual o custo nivelado de energia e a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado para cada tecnologia estudada.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo da dissertação de mestrado, sendo respectivamente conclusões gerais e referentes ao caso de estudo e as perspectivas futuras.

### 8.1. Conclusões

Com o trabalho desenvolvido nesta dissertação, foi possível verificar a viabilidade de instalação das tecnologias estudadas em edifícios, nomeadamente sistemas fotovoltaicos e sistemas eólicos, e apresenta-se numa primeira fase os resultados obtidos para um caso genérico, sem considerar um edifício, e noutra fase os resultados obtidos para o caso de estudo.

Para o Sistema Fotovoltaico:

Em relação a um sistema fotovoltaico, verificou-se que a orientação do mesmo é muito importante, podendo traduzir-se em aumentos de 2,5 vezes de energia produzida entre um sistema voltado a Norte e outro a Sul, considerando a mesma área disponível. Por isso pode concluir-se que de modo a otimizar o sistema convém que o mesmo seja instalado sempre que possível o mais virado a Sul, e com uma inclinação mais próxima do óptimo para o local em estudo.

Em relação aos custos deste sistema, estes são bastante elevados, por isso deve-se tentar chegar a uma relação de produção/custo total, de modo a que o custo não seja muito elevado e a produção seja maximizada, tendo em conta o consumo do edifício.

#### Para o Sistema Eólico:

Em relação a um sistema eólico, quando comparados aerogeradores de diferentes tecnologias e aspectos construtivos mas com potência nominal igual, verifica-se que a escolha entre eles recairia num aerogerador de eixo horizontal de 3 pás. A relação produção/custo total do investimento é a melhor quando comparada com os outros aerogeradores, e deste modo o seu custo nivelado de energia também é o melhor.

Como as velocidades do vento em ambiente urbano são muito reduzidas, este tipo de sistemas comparativamente aos aerogeradores de grande porte produz significativamente menos energia eléctrica.

Consequentemente a sua instalação leva a que tenha que ser realizado um reforço estrutural do edifício de instalação, para poder aguentar as trepidações causadas pelo(s) aerogerador(es).

Através da tabela 6.5 pode concluir-se que para velocidades elevadas em termos de produção de energia, os aerogeradores de eixo horizontal de 2 pás são os mais vantajosos.

### 8.1.1. Caso de Estudo

#### Sistema Fotovoltaico:

Em relação a este tipo de sistema verificou-se que em ambiente residencial a sustentabilidade é possível, e ainda existe a possibilidade de venda à rede, o que em termos financeiros pode ser atractivo e representa sempre um decréscimo do investimento total.

Em relação ao edifício de escritórios, a sustentabilidade não foi atingida, o que leva a pensar que apesar dos elevados índices de eficiência energética o consumo final ainda é bastante elevado e por isso difícil de suprir, muito embora se tenha atingido um índice de sustentabilidade na ordem dos 80%. É relevante referir que este nível de 80% possui um custo extremamente elevado o que não é atractivo do ponto de vista económico.

#### Sistema Eólico:

#### Escritórios e Residencial

Novamente em relação ao edifício analisado no caso de estudo verificou-se que a utilização de aerogeradores (qualquer tipo) não satisfazia os consumos do mesmo, independentemente dos consumos serem característicos de um edifício de escritórios ou de um edifício residencial.

Uma situação possível e passível de estudo é a combinação das duas tecnologias estudadas, com vista a que exista um complemento entre as duas, podendo elevar deste modo o nível de sustentabilidade atingido. A combinação destas duas tecnologias não implica necessariamente um aumento da produção, pois ao instalar aerogeradores a área disponível para painéis fotovoltaicos diminui, e é importante considerar o fenómeno de sombreamento resultante do conjunto torre mais aerogerador, o que vai implicar uma diminuição de produção do sistema FV.

### **Certificação para edifícios não residenciais:**

Relativamente à certificação energética pode concluir-se que a subida de nível (para a classe A+) de um edifício com os valores máximos de consumo permitidos a um edifício ao qual tenha sido atribuída conformidade regulamentar, é possível através da instalação de uma área de  $0,18 \text{ m}^2_{\text{fv}}/\text{m}^2_{\text{útil de pavimento}}$ , assumindo que este sistema é virado a Sul.

### **Em relação ao CO<sub>2</sub> Evitado:**

Em relação à quantidade de CO<sub>2</sub> evitado, é importante referir que todo o CO<sub>2</sub> que é evitado é importante para se atingir a meta definida no protocolo de Kyoto, por isso a simples instalação de 1 m<sup>2</sup> de painéis fotovoltaicos, ou de 1 aerogerador já contribui para a redução de CO<sub>2</sub>. Deste modo, é importante maximizarmos a instalação deste tipo de tecnologias

## **8.2. Perspectivas Futuras**

Os resultados do presente trabalho podem ser o ponto de partida para outros estudos. Deste modo algumas sugestões para esses estudos são apresentadas nos próximos pontos:

- Desenvolvimento de um interface para a ferramenta criada, de modo a torná-la mais interactiva e de fácil utilização para um utilizador comum;
- Estudo da integração combinada de um sistema fotovoltaico com um sistema eólico, tendo em conta a área necessária para um aerogerador que implica automaticamente uma diminuição da área disponível para instalação do sistema fotovoltaico e ainda os sombreamentos resultantes do conjunto torre mais aerogerador;
- Verificação da viabilidade de integração da biomassa como produtor de energia, nomeadamente através de centrais de cogeração, viabilidade do transporte da matéria-prima para o local, e produção associada.



## Referências

- [1] Martins, L., disponível em <http://www.voltimum.pt/news/138//O-braco-de-ferro-do-sec--XXI--->, acesso em 30-09-2008
- [2] Ministério da Economia e da Inovação, “*Energia e Alterações Climáticas*”, Publicação do MEI, 2007
- [3] Ministério da Ciência Tecnologia e Ensino Superior, “*Estratégias para emissões nulas na utilização de combustíveis fósseis em Portugal*”, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2006
- [4] Ernst & Young, “*Renewable Energy Country Attractiveness Indices*”, 2008
- [5] Eicker, U., “*Solar Technologies for Buildings*”, Wiley Editorial, ISBN 0-471-48637-X, 2003
- [6] “Protocolo de Kyoto relativo às alterações climáticas”, disponível em <http://europa.eu/scadplus/leg/pt/lvb/l28060.htm>, acesso em 16-09-2008
- [7] Resolução do Conselho de Ministros nº119/2004 de 31 de Julho
- [8] WEC Study Group on Energy and Climate Change, “Climate Change Policies and Measures, Portuguese National Assessment”, April 2007
- [9] The Chartered Institution of Building Services Engineers London, “*Renewable Energy Sources for Buildings*”, CIBSE TM38, August 2006
- [10] “Building America puts Residential Research Results to Work”, disponível em [http://www.eere.energy.gov/buildings/building\\_america/pdfs/35851.pdf](http://www.eere.energy.gov/buildings/building_america/pdfs/35851.pdf), acesso em 30-09-2008
- [11] Ministério da Economia e da Inovação, “*Microprodução Renovável na Hora - Renováveis na Hora*”, Setembro de 2007
- [12] Ministério da Economia e Inovação, “Notas de Imprensa - Energias Renováveis”, 18-09-2008
- [13] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Política Energética - Caracterização Energética” disponível em <http://www.dgge.pt/>, acesso em 15/09/2008
- [14] Dicionário Universal da Língua Portuguesa
- [15] Ferreira, L. C. “Indicadores Político Institucionais de Sustentabilidade”, Revista Ambiente e Sociedade, NEPAM - UNICAMP, n.6/7, 2000
- [16] World Commission on Environment and Development, 1987
- [17] Da Costa, R. C. & Prates, C. P., “*O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do sector energético e barreiras à sua penetração no mercado*”, Sectorial, Nº 21, Março 2005
- [18] Alvares, L., Azevedo, S., Tavares, J., “*Manual de boas práticas de eficiência energética*”, BCSD Portugal, Novembro 2005



- [19] Janse, Rod, "Towards Energy Efficient Buildings in Europe Final Report", EuroACE, June 2004
- [20] "Reference Package For New Construction & Major Renovations", Segunda Edição, LEED, Maio 2003
- [21] Direcção Geral de Energia e Geologia; Ministério da Economia e da Inovação, "*Eficiência Energética nos Edifícios*", Fevereiro 2002
- [22] Jones, Phil, "*Energy efficiency in buildings CIBSE Guide F*", *CIBSE Publication Department, Second Edition*, Janeiro 2004
- [23] BuildingGreen, Inc., "*An Energy, Environmental, and Economic Resource Guide for Federal Facility Managers and Designers*", U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Federal Energy Management Program, Second Edition, Maio 2001
- [24] Torcellini et al, "*Understanding Zero Energy Building*", ASHRAE Journal, 2006
- [25] National Renewable Energy Laboratory, "Zero Energy Building: A Critical look at the definition", Conference Paper, Junho 2006, disponível em <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>, acesso em 4-1-2009
- [26] Thorne, Andrew, *Renewable energy sources for buildings CIBSE TM38:2008*, *CIBSE Publication Department*, Agosto 2006
- [27] The Architecture firm Skidmore Owings and Merrill, "Design for Guangdong Tobacco Company"
- [28] Lenardic, Denis, "Annual Report 2007". Disponível em <http://www.pvresources.com>, acesso em 7-01-2009.
- [29] Solar Energy International, "Photovoltaics: Design and Installation Manual", New Society Publishers, 2004.
- [30] Disponível em [http://www.displayplus.net/bbs/data/report/Solar\\_Buzz.gif](http://www.displayplus.net/bbs/data/report/Solar_Buzz.gif), acesso em 7-01-2009
- [31] Disponível em <http://www.renovaveis.tecnopt.com/fontes-de-energia/energia-solar/>, acesso em 7-01-2009
- [32] Castro, Rui M.G., "*Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Fotovoltaica*", IST, Maio 2008.
- [33] Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente, "*Tecnologias de Micro-Geração Fotovoltaica e Sistemas Periféricos*", 2008
- [34] "*Energia Solar Térmica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*", Janeiro de 2004, disponível em <http://www.greenpro.de/po/solartermico.pdf>, acesso em 7-01-2009
- [35] Incropera, F., DeWitt, D., "*Fundamentos de transferência de calor e de massa*", Livros Técnicos e Científicos Editora, 4ª Edição, 1998
- [36] Laboratório de Aplicações Fotovoltaicas e Semicondutores, disponível <http://solar.fc.ul.pt/faq.htm> acesso em 7-1-2009
- [37] Scharmer, K and J. Greif, Eds, "*Atlas Europeu de Radiação Solar*", 2000
- [38] "*Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*", Janeiro de 2004
- [39] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, "*Desempenho térmico de edificações*", Módulo 2, 2005
- [40] Solar Plots, disponível em <http://solarplots.info>, acesso em 8-1-2009
- [41] Agencia Nacional para a Cultura Científica e Tecnológica, "*Guia da Energia Solar*"

- [42] Energia Lateral, disponível em <http://www.energialateral.pt/solar.html>, acesso em 8-01-2009
- [43] Jayme da Costa, “*Integração Energia Solar em Edifícios - BIPV*”, Maio de 2007
- [44] Association for promotion of e-Learning tools for Electrical Engineering, “*Energia Solar - Efeito Fotovoltaico*”, 2003
- [45] Blue Sky Energy, “*What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work*”, Home Power Magazine, 2000
- [46] Bp Solar, disponível em <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9008642&contentId=7015996>, acesso em 9-01-2009
- [47] Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações e de Computadores, disponível em <http://www.deetc.isel.ipl.pt>, acesso em 9-1-2009
- [48] Associação Europeia da Energia Eólica, disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia\\_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) acesso em 12-01-2009
- [49] Zervos, Arthouros, Presidente da *World Wind Energy Association*
- [50] *World Wind Energy Association*, 2008, disponível em [www.wwinea.org](http://www.wwinea.org), acesso em 13-01-2009
- [51] Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, disponível em <http://www.ineti.pt/>, acesso em 12-01-2009
- [52] Rede Eléctrica Nacional, “*A Energia Eólica em Portugal*”, Agosto 2008
- [53] Ramage, J., “*Energy: a Guidebook*” Oxford University Press, 1997
- [54] Disponível em <http://static.hsw.com.br/gif/wind-power-3.jpg>, acesso em 12-01-2009
- [55] Domingos, J. Delgado, Professor Catedrático do IST, “*Energia Eólica*”, Dezembro 2005
- [56] Paul, Blackmore, “*Siting Micro-Wind Turbines on House Roofs*”, Bretrust, 2008
- [57] Ackermann, T., “*Wind Power in Power Systems*”, John Wiley & Sons, ISBN 0-470-85508-8, 2005
- [58] Danish Wind Industry Association, “*The Power of the Wind: Cube of Wind Speed*”, 1 June 2003
- [59] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, “*Energia Eólica Princípios e Tecnologias*”, Maio 2008
- [60] Danish Wind Industry Association, “*Wind Energy Reference Manual Part 1: Wind Energy Concepts*”, 12 May 2003
- [61] Costa, P., “*Optimização da Produção de energia em sistemas eólicos*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [62] Disponível em <http://www.wasp.dk/support/FAQ/WebHelp/Wasp9.htm#RoughnessofaTerrain.htm>, acesso em 13-01-2009
- [63] Mortensen, N.G., Landberg L., Troen L., “*Wind Atlas Analysis and Application Program*”, Vol. 1: *Getting Started*, Riso National Laboratory, January 1993
- [64] Zenti-Energies, disponível em <http://www.zenit-energies.com/eole.php>, acesso em 13-01-2009
- [65] Quaschnig, V., “*Understanding Renewable Energy Systems*”, Earthscan, cop. 2005, ISBN 978-1-84407-128-9, 2005
- [66] *Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers*, 2008

- [67] Patel, M. R., “*Wind and Solar Power Systems: design, analysis, and operation*”, Taylor & Francis, ISBN 0-8493-1570-0, 2006
- [68] RetScreen, disponível em <http://www.etscreen.net/>, acesso em 19-01-2009
- [69] Clênio, Bohmer, “*Optimização da Inclinação de módulos Fotovoltaicos em Função da Radiação Solar Incidente*”, Janeiro 2006
- [70] Lorenzo, E., “*Radiación Solar y dispositivos fotovoltaicos*”, PROGENSA, Volume. 2, 2006
- [71] Vianello, R. L.; Alves A. R., “*Metereologia básica e aplicações*”, Imprensa Universitária, 2002
- [72] Dados da Organização Metereológica Mundial
- [73] Duffie, J. A.; Beckman, W. A., “*Solar engineering of thermal processes*”, Jonh Wiley & Sons, 1980
- [74] Decreto Lei 63/2008, de 21 de Janeiro 2008
- [75] Castro, Rui M.G., “*Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica*”, IST, Março 2008
- [76] U.S. Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy, disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata/6\\_europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT\\_Porto\\_IWEC.stat](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata/6_europe_wmo_region_6/PRT_Porto_IWEC.stat), acesso em 16-01-2009
- [77] Decreto-lei 78/2006 - (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior) e Decreto-lei 79/2006 (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios), Ministério da Economia e da Inovação.
- [78] Agência para a Energia, Certificação Energética e Ar Interior, “*Processo da Certificação*”, disponível em <http://www.adene.pt/ADENE/Canais/SubPortais/SCE/SCE/ProcessodaCertificacao/Classes+de+desempenho+Energ%C3%A9tico.htm>, acesso em 20-01-2009

## Anexo I - Cálculo do Integral de $R_b$

O factor geométrico  $R_b$  é a razão entre a radiação solar directa sobre uma superfície inclinada e a radiação solar directa sobre um plano horizontal.

$$R_b = \int_{w's}^{w'p} \frac{\frac{24}{2\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times \theta_s}{\frac{24}{\pi} \times I_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times d_n}{365}\right)\right) \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} \partial w$$

Substituindo  $\theta_z$  e simplificando:

$$R_b = \int_{w's}^{w'p} \frac{(\sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\alpha) \times \sin(w) \times \sin(\beta))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} \partial w$$

$$R_b = \frac{\int_{w's}^{w'p} (\sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\alpha) \times \sin(w) \times \sin(\beta))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))} \partial w$$

Dividindo o integral e considerando só o numerador, porque o denominador não depende de  $w$ :

$$\begin{aligned} \text{Denoinador} = & \int_{w's}^{w'p} (\sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta)) \partial w - \int_{w's}^{w'p} \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \partial w \\ & + \int_{w's}^{w'p} \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times \cos(w) \partial w + \int_{w's}^{w'p} \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times \cos(w) \partial w + \int_{w's}^{w'p} \cos(\delta) \times \sin(\alpha) \times \sin(\beta) \times \sin(w) \partial w \end{aligned}$$

Finalmente resulta:

$$\begin{aligned} \text{Denominador} = & \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (w'_p - w'_s) - \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times (w'_p - w'_s) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s)) + \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \\ & \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s)) - \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\alpha) \times (\cos(w'_p) - \cos(w'_s)) \end{aligned}$$

Rb é igual a:

$$= \frac{R_b \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (w'_p - w'_s) - \sin(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times (w'_p - w'_s) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \cos(\beta) \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s)) + \cos(\delta) \times \sin(\emptyset) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha) \times (\sin(w'_p) - \sin(w'_s)) - \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\alpha) \times (\cos(w'_p) - \cos(w'_s))}{2 \times (|w_s| \times \sin(\delta) \times \sin(\emptyset) + \cos(\delta) \times \cos(\emptyset) \times \sin(|w_s|))}$$